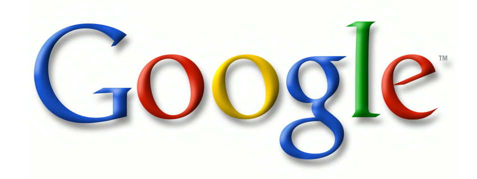




[SÉ]RIE A, N° 16
[N]° D'ORDRE
17.

THÈSES

PRÉSENTÉES

À LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS,

PAR

M. Jules SEMENOV.

1re THÈSE. — Recherches expérimentales sur l'étincelle électrique.

2e THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

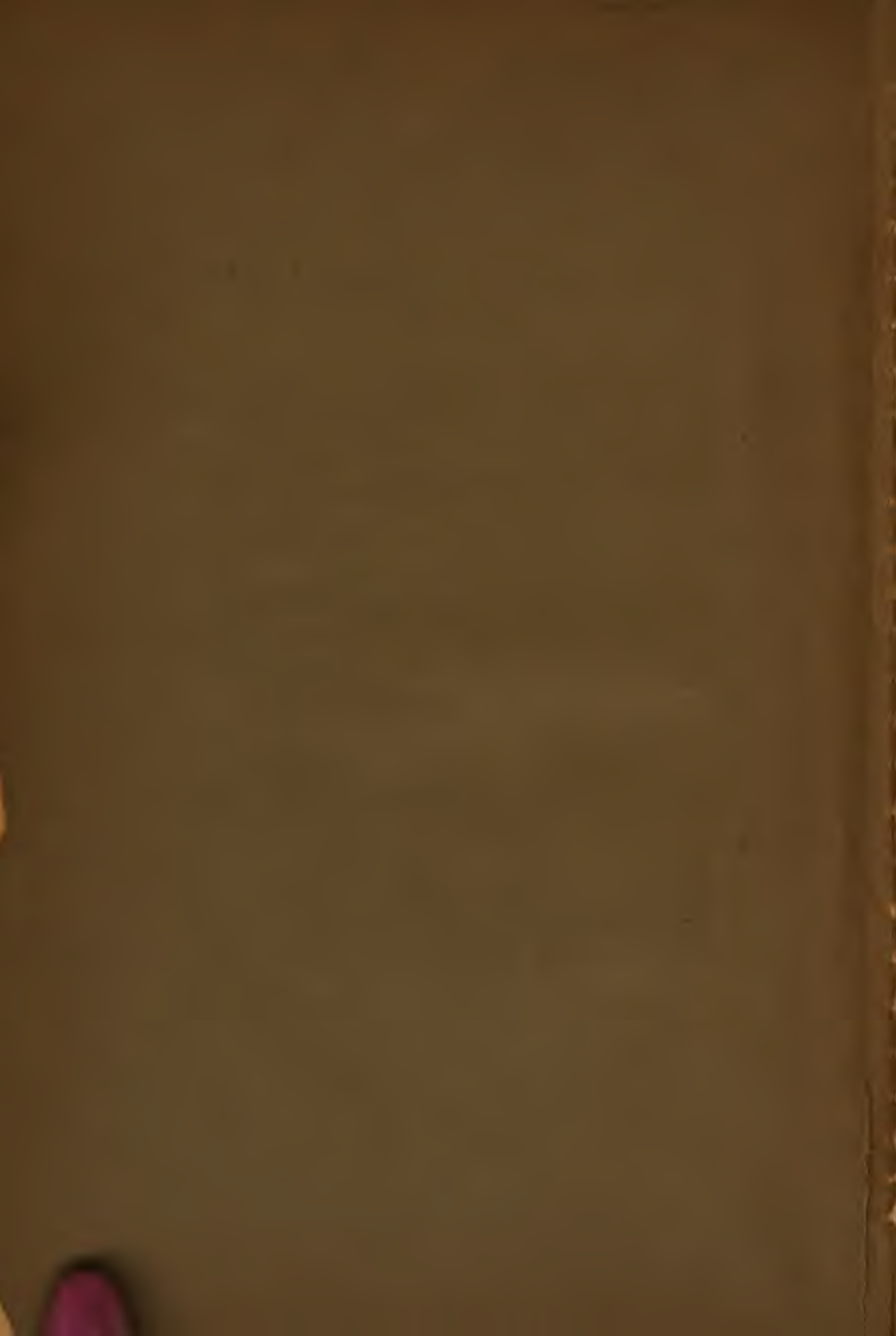
Soutenues le 16 mars 1904, devant la Commission d'Examen.

MM. LIPPMANN, *Président.*
BOUTY, MOISSAN, *Examinateurs.*

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1904





SÉRIE A, N° 16
N° D'ORDRE
17.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS,

PAR

M. Jules SEMENOV.

1re THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR L'ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE.

2e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 18 mars 1904, devant la Commission d'Examen.

MM. LIPPMANN, *Président.*
BOUTY, MOISSAN, } *Examinateurs.*

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1904

UNIVERSITÉ DE PARIS.

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

	MM.	
Doyen	P. APPELL	Mécanique rationn.
Doyen honoraire	G. DARBOUX, Professeur.	Géométrie supér.
Professeurs honoraires	L. TROOST.	
	CH. WOLF.	
Professeurs	LIPPMANN	Physique.
	BOUTY	Physique.
	DUCLAUX	Chimie biologique.
	BOUSSINESQ	Physique mathématique et Calcul des probabilités.
	PICARD	Analyse supérieure et Algèbre supér.
	H. POINCARÉ	Astronomie mathématique et Mécanique céleste.
	YVES DELAGE	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
	G. BONNIER	Botanique.
	DASTRE	Physiologie.
	DITTE	Chimie.
	GIARD	Zoologie, Évolution des êtres organisés.
	KŒNIGS	Mécanique physique et expérimentale.
	VÉLAIN	Géographie phys.
	GOURSAT	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	CHATIN	Histologie.
	PELLAT	Physique.
	HALLER	Chimie organique.
	H. MOISSAN	Chimie.
	JOANNIS	Chimie (Enseignement P. C. N.).
	P. JANET	Physique (Enseignement P. C. N.).
	WALLERANT	Minéralogie.
	ANDOYER	Astronomie phys.
	PAINLEVÉ	Mathémat. générales.
	HAUG	Géologie.
	N	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
Professeurs adjoints	PUISEUX	Mécanique et Astronomie.
	RIBAN	Chimie analytique.
	RAFFY	Analyse et Mécan.
	LEDUC	Physique.
	HADAMARD	Calcul différentiel et Calcul intégral.
Secrétaire	A. GUILLET.	

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
33844 Quai des Grands-Augustins, 55.

A

MONSIEUR G. LIPPMANN,

MEMBRE DE L'INSTITUT ET DU BUREAU DES LONGITUDES.

Hommage respectueux.

A

MONSIEUR V. VERNADSKY,

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE MOSCOU.

Hommage d'affectueuse considération.

PREMIÈRE THÈSE.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

L'ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE.

INTRODUCTION.

L'étude de la décharge électrique dans les gaz a pris, dans le dernier quart du siècle passé, une extension considérable. Elle a soulevé des questions de haute importance. Et pourtant, la manifestation la plus habituelle de cette décharge, la production de l'étincelle dans l'air à la pression atmosphérique, demeure inexpliquée. Bien restreint est, en effet, le nombre des chercheurs qui ont abordé son étude au point de vue qualitatif.

Cependant, la décharge dans les gaz raréfiés a attiré l'attention des physiciens, et nombreux sont les travaux qui s'y rapportent.

L'importance des découvertes récentes justifie cet intérêt suscité par les manifestations du courant électrique dans les ampoules évacuées, mais les conditions toutes particulières de leur production, ainsi que leur complexité, masquent le phénomène primordial de la décharge et empêchent de distinguer les effets secondaires d'avec les causes fondamentales. Il s'ensuit que les théories récentes de la décharge disruptive, qui re-

posent sur les phénomènes observés dans ces conditions particulières, ont le défaut de ne pas être complètes.

Cela étant, j'ai cru devoir faire précéder la description de mes recherches personnelles sur l'étincelle électrique d'un exposé historique un peu étendu.

Il m'a semblé utile de rappeler quelques-unes des expériences anciennes avec leurs résultats, un peu oubliés ou négligés, mais qui me paraissent assez conformes à ceux des travaux récents. Un aperçu historique de l'évolution des idées sur une question, dont la solution n'est pas encore trouvée, remplace souvent avec avantage des discussions abstraites sur des données expérimentales insuffisantes, tout en remettant en mémoire les erreurs commises.

J'ai choisi, parmi les recherches sur la décharge électrique, celles d'abord qui ont trait à l'étude de la constitution de l'étincelle, en commençant par l'hypothèse de Faraday sur la polarisation du diélectrique dans un champ électrostatique. D'autre part, j'ai donné un aperçu des travaux sur la décharge électrique dans les gaz raréfiés, qui ont abouti à la théorie des ions. J'ai fait un court résumé de la théorie corpusculaire des ions de M. J.-J. Thomson et de sa théorie de la décharge disruptive, la seule théorie plus ou moins complète de ce phénomène. J'en ai indiqué les points qui m'ont paru par trop hypothétiques. J'ai énuméré aussi des faits expérimentaux auxquels cette théorie ne saurait s'appliquer ou qui sont en contradiction avec elle.

Mes expériences personnelles sur l'étincelle électrique sont purement qualitatives. Ce genre de recherches présente l'inconvénient apparent d'avoir un caractère moins précis que les expériences quantitatives. Mais, si ces dernières exigent souvent des appareils compliqués et des méthodes délicates, l'étude qualitative d'un phénomène physique demande une grande variété de moyens d'in-

vestigation et une multiplicité d'expériences effectuées dans les conditions les plus diverses.

D'ailleurs, l'étude quantitative d'un phénomène ne peut être fructueuse que si son mécanisme est bien établi. Il n'en est pas ainsi de l'étincelle électrique.

De toutes les expériences que j'ai entreprises et de tous les appareils que j'ai construits au cours de ce travail, je ne décris que ce qui me paraît le plus typique, le plus concluant au point de vue des résultats.

J'avais pour but l'étude du mécanisme des différentes parties de l'étincelle, dont la distinction fut établie par Feddersen. Ce physicien a constaté, comme on sait, deux phases de l'étincelle électrique : le trait lumineux et l'auréole. MM. Schuster et Hemsalech ont étudié les propriétés de ces phases, sans expliquer leur mécanisme.

Pour étudier le mécanisme d'un phénomène physique, il faut déceler les forces qui le déterminent, leurs directions et leur valeur. Il faut aussi déterminer les constantes qui caractérisent ce phénomène.

L'objet du récent travail de M. E. Bouty est précisément l'étude des constantes des gaz que traverse une décharge électrique. Quant aux forces mises en jeu dans une étincelle, elles me paraissaient peu connues. Il m'a semblé que la différence radicale entre le trait lumineux et l'auréole, constatée par MM. Schuster et Hemsalech, se trouvait en contradiction avec la conception que ce phénomène est dû aux seules forces dirigées d'un pôle à l'autre.

Pour trancher cette question il fallait préciser les caractères de tous les mouvements de la matière sur le trajet de l'étincelle électrique. En déterminant leur direction on détermine les directions des forces mises en jeu.

C'est cette question qui fait l'objet de mon travail.

Je tiens à exprimer ici mes remercîments à mon maître, M. G. Lippmann, Directeur du laboratoire des

recherches physiques à la Sorbonne, où ces expériences furent exécutées; à M. Hemsalech, auquel je me suis souvent adressé pour des renseignements concernant son important travail sur l'étincelle électrique; à MM. de Watteville et Néculcéa qui m'ont aidé dans la partie spectroscopique de mes recherches. Je remercie M. Bouty, Directeur du laboratoire d'enseignement, qui m'a autorisé à faire quelques expériences avec sa batterie d'accumulateurs. Je remercie M. V. Crémieu qui a mis à ma disposition, pour ces expériences, son installation au laboratoire de M. Bouty.

I. — HISTORIQUE.

1. Les premières connaissances sur la décharge électrique datent du XVIIe siècle. Le Dr Wall, après avoir électrisé par frottement un gros morceau d'ambre, a obtenu une étincelle électrique avec tous ses attributs : bruit, mouvement de matière et lumière. « Cette lumière et ce bruit, dit le Dr Wall, paraissent en quelque sorte représenter l'éclair et le tonnerre » (1).

A la même époque, Picard en France et Boyle en Angleterre ont observé des lueurs dans le vide barométrique. Ce sont la première étincelle et la première effluve observées dans les laboratoires.

Plus de deux siècles se sont écoulés depuis cette époque, et nous ne sommes pas encore fixés sur la nature véritable de l'étincelle électrique ni sur la nature de l'énergie qui en est la cause.

En 1733, Du Fay, membre de l'Académie royale des Sciences à Paris, a établi la distinction entre l'électricité *vitrée* et l'électricité *résineuse* (2), cette distinction qui

(1) POGGENDORFF, *Histoire de Physique*.
(2) *Mémoires de l'Académie royale des Sciences*, 1733, p. 469.

fut développée plus tard par Coulomb dans sa *Théorie des deux fluides électriques*. Du Fay a trouvé en outre que les diélectriques sont transparents aux *écoulements* électriques, tandis que les métaux ne le sont pas (Du Fay, *Troisième Mémoire sur l'Électricité*). Il appelait *écoulement* électrique le phénomène auquel Faraday a donné le nom de *lignes des forces* électriques, de sorte que Du Fay fut le premier qui a compris le rôle important du diélectrique dans les phénomènes électriques.

2. Hauksbée a étudié la décharge électrique sous des pressions différentes, et il a trouvé que l'air raréfié est plus conducteur que l'air sous la pression atmosphérique. Ce physicien employait un ballon de verre sphérique et disposé de sorte qu'on pût le faire tourner sur son axe au moyen d'une grande roue. En posant la main sur le ballon tournant très rapidement, l'air le remplissant devenait lumineux lorsque sa pression était faible. Mais à la pression atmosphérique « la lumière s'élançait au dehors et s'attachait aux corps voisins en forme d'étincelles » (1).

3. H. Davy a étudié la décharge électrique dans les gaz raréfiés, désirant se rendre compte si le vide absolu est conducteur de l'électricité ou non. Il a trouvé que le *vide de Boyle* est conducteur de l'électricité, tandis que le *vide de Torricelli* ne l'est pas. Sans rien présumer sur la nature de l'électricité, Davy conclut que la matière pondérable est nécessaire à la propagation des courants électriques (2). Il employait pour ses expériences un tube barométrique recourbé à sa partie inférieure et rempli de mercure bien purgé d'air, ou bien d'un métal ou d'un amalgame en fusion. Une machine électrostatique, dont un des pôles se trouvait en communication métallique avec le mercure du tube barométrique, fournissait la

(1) Hauksbée et Du Fay, *Premier Mémoire sur l'Électricité*, 1733.
(2) *Ann. de Chim. et de Phys.*, 2e série, t. XX, 1822.

charge électrique nécessaire aux expériences. Dans ces conditions, en faisant varier la pression du gaz dans la chambre barométrique, Davy a pu observer tous les phénomènes lumineux accompagnant la décharge électrique, en commençant par l'étincelle ordinaire et jusqu'à la fluorescence verte des parois du tube barométrique pendant que le gaz très raréfié reste obscur. Entre autres phénomènes, Davy a remarqué que lorsqu'on fait bouillir le mercure dans un tube barométrique, dans lequel on a obtenu le vide le plus parfait, la vapeur mercurielle qui s'y dégage est fluorescente.

J'ai répété plusieurs expériences de Davy avec le tube barométrique recourbé et fermé à ses deux extrémités. Dans ces conditions, le mercure se trouvant complètement isolé et une armature extérieure reliée à la machine électrostatique ou à un pôle de la bobine d'induction, on peut observer les phénomènes de charge résiduelle et de *retard* de la décharge. En effet, lorsqu'on a plusieurs tubes identiques, mais dans lesquels la pression du gaz dans la chambre barométrique n'est pas la même pour tous les tubes, et que toutes leurs armatures externes sont reliées entre elles, la lumière n'apparaît pas en même temps dans tous les tubes. Elle apparaît d'abord dans le tube dont le gaz se trouve à la pression la plus faible et ensuite dans tous les autres, et les intervalles qui séparent ces éclairs successifs sont assez considérables pour pouvoir être appréciés à l'observation directe.

Lorsque les armatures externes des tubes en question sont reliées à un des pôles d'une machine électrostatique, le gaz des chambres barométriques ne devient lumineux qu'au moment où une étincelle éclate entre les deux pôles de la machine, quelle que soit la distance qui les sépare. Il faut donc que la colonne du mercure soit parcourue par des oscillations électriques pour que le gaz devienne lumineux.

En outre, lorsque la machine électrostatique ou la bobine d'induction cesse de fonctionner, on peut observer dans la chambre barométrique la production d'une série d'éclairs dus à la charge résiduelle. Ces éclairs, de moins en moins lumineux et de plus en plus espacés, durent pendant quelques minutes; quelquefois j'ai pu compter jusqu'à dix éclairs successifs.

4. Faraday a continué les recherches de H. Davy et les conclusions qu'il a tirées de ses expériences restent toujours de l'actualité. Grâce à son intuition extraordinaire, il est arrivé à cette conception fertile d'après laquelle la lumière et l'électricité sont des phénomènes de même nature et que ce sont deux facteurs qui nous permettront de connaître la constitution de la matière ([1]).

D'après les idées de Faraday, tout conducteur électrisé et isolé au sein d'un diélectrique est un centre de lignes des forces qui le relient à tous les conducteurs se trouvant dans son voisinage. Ces lignes des forces se traduisent par une certaine tension du diélectrique, dont les molécules acquièrent un état de polarisation spéciale ([2]) qui s'accentue de plus en plus lorsqu'on augmente la charge du conducteur. Dès que la limite supérieure de cette tension est atteinte, le diélectrique cède : c'est l'étincelle qui éclate. Cette tension limite est la mesure de la résistance que le diélectrique oppose à la décharge, et, comme elle se traduit par la polarisation des molécules, la résistance totale suivant une ligne des forces est la somme des résistances de toutes les molécules se trouvant sur cette ligne (*loc. cit.*, § 1370). Il s'ensuit que la résistance du diélectrique sera vaincue dès que, dans une rangée de molécules polarisées représentant une ligne des forces, une seule aura sa tension maximum dépassée.

([1]) FARADAY, *A speculation touching electric conduction and the nature of matter.*

([2]) FARADAY, *Exper. researches in electr.* (§§ 1362 et 1368).

Il en résulte que toute impureté doit avoir une influence considérable sur la résistance que le diélectrique oppose à la décharge. En effet, M. R.-J. Strutt (¹) a démontré que la différence de potentiel minimum pour une distance explosive donnée reste constante dans un gaz absolument pur, mais la présence de quantité insignifiante d'un autre gaz quelconque modifie d'une façon remarquable les conditions de la décharge. Ainsi M. Strutt a obtenu le chiffre de 388 volts comme minimum de potentiel explosif dans l'azote pour des conditions expérimentales déterminées. Ce minimum s'est abaissé jusqu'à 251 volts, lorsque, sans rien changer à ces conditions, les traces d'oxygène furent enlevées par un alliage de sodium et de potassium.

Nombre de phénomènes découverts postérieurement viennent à l'appui de cette manière d'envisager l'*electrical strength* ou la *cohésion diélectrique* des gaz. Les travaux récents de M. E. Bouty, sur la *cohésion diélectrique* des gaz, confirment que c'est une propriété moléculaire, constante pour un même gaz et indépendante de la température sous volume constant. Il résulte des expériences de ce physicien qu'aucune trace du courant électrique ne se manifeste entre les armatures d'un condensateur tant que la limite de la cohésion diélectrique du gaz n'est pas atteinte. Mais, dès que cette limite est atteinte, le gaz s'illumine instantanément et devient conducteur. Le gaz subit donc à ce moment une transformation radicale. En admettant, avec Faraday, que l'*electrical strength* se traduit par une polarisation des molécules, la transformation, au moment de la décharge, doit être une transformation moléculaire. L'étude de cette transformation peut être faite de deux façons différentes :

(¹) R.-J. STRUTT, *Philos. Trans.*, 1900, et J.-J. THOMPSON, *Conduct. of electr. through gazes*, 1903, p. 364.

ou l'on peut étudier le moment même du passage d'un état à l'autre, comme nous l'avions fait dans les expériences dont nous donnons la description dans le Chapitre II, ou bien on peut étudier l'état de polarisation du diélectrique avant sa transformation, en déterminant l'orientation des forces qui se manifestent dans son sein. Cette dernière étude fut faite par M. Nicolaïew (¹).

5. Les expériences de M. Nicolaïew avaient pour but de montrer l'existence d'une tension au sein d'un diélectrique suivant les lignes des forces. La méthode expérimentale de ce physicien est la suivante : Supposons que deux points A et B (*fig.* 1) sont chargés, A positivement

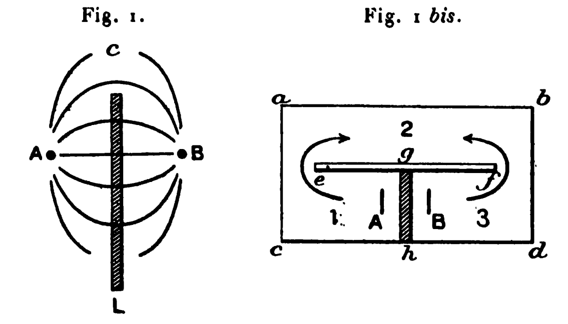


Fig. 1. Fig. 1 *bis*.

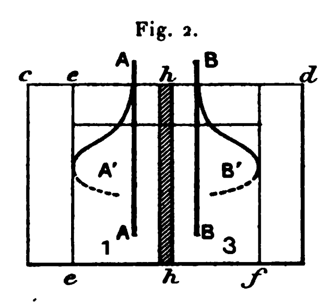
et B négativement. Ces deux points seront réunis par des lignes des forces symétriques par rapport à la droite AB. En raison de la symétrie des forces, A et B tendront à se réunir en suivant le chemin AB. Mais, si nous coupons le champ électrique par une lame isolante L, dont la constante diélectrique est supérieure à la constante du milieu dans lequel se trouvent les points A et B, le point A sera sollicité dans la direction de la ligne A*c*B, en contournant la lame L.

Voici une de ces expériences. Dans une cuve *abcd*, dont la coupe horizontale est représentée sur la figure 1 *bis*,

(¹) *Société de Physique*, 1903, et *Philos. Mag.*, 6ᵉ série, t. IV, 1902.

plongent deux fines bandes en feuilles d'étain A et B, suspendues verticalement, comme on voit sur la coupe verticale (*fig.* 2). Les extrémités supérieures des bandes

Fig. 2.



sont fixes et en communication métallique avec les pôles d'un transformateur donnant une différence de potentiel de 15000 volts. La cuve est remplie d'eau distillée. Deux parois en verre *ef* et *gh* (*fig.* 1 *bis*) la partagent en trois compartiments, qui se communiquent de la façon suivante : 1 communique avec 2, 2 avec 3, tandis que 1 n'a aucune communication directe avec 3. Dans ces conditions, dès qu'on fait fonctionner le transformateur, les bandes A et B accusent un mouvement, leurs extrémités inférieures libres se déplacent dans la direction des flèches de la figure 1 *bis*, en contournant la paroi *ef*, et les bandes prennent des positions nouvelles AA' et BB' de la figure 2. Deux phases sont à considérer dans ce phénomène. Dans la première phase, les bandes s'écartent comme s'il existait entre elles une répulsion; leurs extrémités inférieures quittent les positions A et B et s'approchent des bords *e* et *f* de la paroi *ef*. Ces bords, une fois atteints, les bandes les contournent (c'est la deuxième phase du phénomène) et entrent dans le compartiment 2 de la cuve. Là elles se meuvent dans le sens contraire au précédent, comme si elles étaient attirées l'une vers l'autre, et prennent les positions A' et B'. Ces mouvements paradoxaux, accusant tantôt une répulsion entre

les bandes d'étain, tantôt une attraction, s'expliquent aisément, d'après l'image donnée par Faraday, d'après laquelle les lignes des forces entre deux armatures d'un condensateur chargé sont assimilables aux fils élastiques tendus. En se contractant elles tendent à rapprocher les armatures l'une vers l'autre. Dans l'expérience décrite ci-dessus les armatures A et B ne peuvent se rapprocher qu'après avoir exécuté les mouvements complexes suivant les flèches de la figure 1 *bis*.

Ces expériences confirmant les idées de Faraday n'expliquent pas cependant le phénomène de l'étincelle électrique; bien que Faraday ait étudié l'étincelle, mais son analyse méthodique ne commence qu'à partir des recherches de Masson et de Feddersen.

6. Masson a repris les expériences de Davy sur la décharge électrique dans les gaz raréfiés; après en avoir répété plusieurs, il en a exécuté d'autres dans des conditions différentes. Il s'est attaché surtout à l'étude de l'étincelle dans l'air en employant des méthodes optiques : photométrie et spectroscopie (¹). Ses conclusions concordent avec celles de Davy; il a confirmé notamment que la matière est nécessaire à la propagation de l'électricité. Il confirma, en outre, une observation de Faraday, d'après laquelle la nature du gaz influe sur la résistance à la décharge électrique. Mais il n'a pas pu préciser le caractère de cette influence ni formuler une loi quantitative du phénomène.

Parmi les nombreux résultats spectroscopiques, Masson signale une particularité qu'il a observée le premier. Il a trouvé que dans tous les spectres de l'étincelle plusieurs raies se retrouvent dans tous les cas, quelle que soit la nature des électrodes, mais que l'intensité de ces raies varie suivant le métal employé. Ces raies appartenant au

(¹) *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3ᵉ série, t. XIV, XXX et XXXI.

spectre de l'air furent étudiées par M. Hemsalech ([1]), qui a observé que l'influence des électrodes sur les raies de l'air est sélective, c'est-à-dire qu'avec les différents métaux la variation de l'intensité n'est pas la même pour toutes les raies.

Voici, par exemple, un Tableau de variation d'intensité de trois raies de l'air, suivant que les électrodes sont en Al, en Sn ou en Bi :

λ.	Al.	Sn.	Bi ([2]).
4705,4	8	5	10
4699,2	8	4	0
4661,8	0	3	1

Dans ce Tableau, la première colonne verticale représente les longueurs d'ondes en unités Armstrong, les chiffres des trois colonnes suivantes correspondent aux intensités relatives des raies considérées, les électrodes étant successivement en aluminium, en étain et en bismuth. On voit que les variations d'intensité des raies n'obéissent pas à une loi simple, mais l'influence sélective des électrodes en ressort d'une façon indiscutable. Les caractères de la décharge électrique ne dépendent donc pas seulement de la nature du diélectrique qui sépare les conducteurs chargés, mais aussi de la nature du métal des électrodes.

7. *Constitution de l'étincelle électrique.* — Feddersen a étudié l'étincelle électrique au point de vue de sa constitution ([3]). La méthode employée par Feddersen était celle du miroir tournant de Wheatstone. Grâce à ce procédé, Feddersen a pu établir la possibilité de trois

---

([1]) *Recherches expérimentales sur les spectres d'étincelles.* Paris, Hermann, 1901.

([2]) *Loc. cit.*, p. 117.

([3]) *Pogg. Ann.*, t. CIII, 1857 et *Ann de Chim. et de Phys.*, 3e série, t. LXIX, 1863.

modes de décharges en fonction de la longueur, de la capacité et de la résistance du circuit. Ces trois modes sont les suivants : la décharge continue, la décharge intermittente et la décharge oscillante.

1° La décharge continue est celle où la charge d'un plateau condensateur s'écoule en entier sur l'autre par l'étincelle sans que celle-ci soit interrompue une seule fois. Pendant toute la durée d'une décharge continue, les pôles ne changent pas de signe.

2° La décharge intermittente se distingue de la précédente en ce que la charge d'une capacité ne s'écoule pas en entier avec une seule étincelle. La décharge intermittente est une série d'étincelles successives partant toutes du même pôle.

3° Dans la décharge oscillante, le courant électrique parcourt l'intervalle entre les électrodes alternativement dans les deux sens, ce qui détermine une émission alternative de la vapeur métallique luminescente par chacune des électrodes.

Feddersen a remarqué, en outre, que toute étincelle, quel que soit le mode de la décharge, est constituée par une *étincelle partielle* très fine et par une traînée de particules incandescentes projetées par les électrodes.

Lorsqu'une étincelle verticale est observée dans un miroir tournant, également vertical, l'*étincelle partielle* se dessine en ligne droite verticale et très fine. « C'est cette étincelle, dit Feddersen, qui établit la continuité du circuit et, à partir de cet instant, la marche ondulatoire de la décharge s'établit régulièrement [1]. »

Quant aux projections incandescentes qui suivent cette première phase de la décharge, leurs images dans le miroir tournant ressemblent à une série de flammes courbées dont la convexité est tournée vers le pôle vers lequel les parti-

---

(1) *Loc. cit.*, p. 193.

cules sont lancées. D'après cet aspect de l'étincelle, Feddersen pense que « les particules métalliques lancées par les électrodes ne prennent plus part, dès qu'elles sont détachées, au mouvement électrique et qu'elles suivent la direction du mouvement qu'elles reçoivent en se détachant, soit que cette direction soit celle du mouvement de l'électricité déterminé par la première étincelle partielle, soit que ces deux directions ne coïncident pas (1) ».

Il résulte de ces expériences, d'après Feddersen, que le courant électrique dans l'étincelle n'est pas un courant de convection et que le mouvement des particules métalliques n'est qu'un phénomène secondaire accompagnant la décharge électrique.

Nous verrons dans la suite que dans des conditions déterminées l'étincelle peut être complètement débarrassée de son auréole de vapeur métallique, à laquelle on pourra imprimer artificiellement une direction autre que celle du courant électrique.

La première *étincelle partielle* ou le *trait lumineux* de la décharge électrique et les projections métalliques des électrodes ou l'*auréole* de l'étincelle furent étudiés par MM. Schuster et Hemsalech, qui ont démontré que ces deux phases de l'étincelle se distinguent entre elles d'une façon essentielle au point de vue spectroscopique, ainsi qu'au point de vue de leur rôle dans la décharge électrique.

En outre, les expériences récentes de M. Hemsalech prouvent que l'étincelle intermittente ne se distingue de l'étincelle oscillante qu'en ce que la première est une série d'étincelles oscillantes de courte durée. Il n'y aurait donc que deux ordres de décharge : décharge continue et décharge oscillante.

8. La méthode employée par MM. Schuster et Hemsa-

---

(1) *Loc. cit.*, p. 188.

lech est plus sensible que celle de Feddersen et elle leur a permis de faire une véritable analyse de l'étincelle électrique au point de vue de sa structure (¹). L'image d'une étincelle ou de son spectre est projetée sur une pellicule sensible tournant avec une grande vitesse. La vitesse linéaire de la pellicule étant de 100^m par seconde, les raies du spectre se dessinent d'une façon inégale selon qu'elles proviennent de l'air ou de la vapeur métallique incandescente. Les raies de l'air restent rectilignes mais élargies, tandis que les raies métalliques s'incurvent, d'où MM. Schuster et Hemsalech concluent que les particules métalliques sont projetées des électrodes avec une vitesse mesurable. Leur vitesse est d'autant plus grande que le poids atomique du métal employé est plus faible.

En outre, sur les photographies obtenues par le même procédé, mais sans interposition du prisme, on aperçoit une ligne droite joignant les pôles, visibles sur la photographie, et une série de lignes courbes partant d'un pôle sans arriver sur l'autre. La ligne droite est due au trait lumineux de l'étincelle, et les lignes courbes à l'auréole. En comparant ces photographies aux précédentes, les auteurs concluent que « la décharge initiale donne le spectre du gaz et que les oscillations qui ont lieu dans l'auréole donnent le spectre du métal ». D'après M. Hemsalech, l'étincelle électrique se produit de la manière suivante : la couche d'air entre les deux électrodes est d'abord percée par la décharge initiale; ensuite l'air qui se trouve dans le voisinage immédiat du chemin parcouru par la décharge est rendu incandescent : c'est le *trait lumineux*. Mais, immédiatement après, l'espace compris entre les deux électrodes se remplit de la vapeur métallique produite et entraînée par la décharge initiale : c'est

(¹) *Philosoph. Transact.*, t. CXCIII, 1899; HEMSALECH, *Thèse de l'Univ. de Paris*, 1901 et *Journ. de Phys.*, février 1902.

l'*auréole*. M. Hemsalech suppose que ce « flux de la vapeur métallique est probablement dû en partie à l'état de raréfaction de l'espace entre les électrodes, état causé par la décharge initiale ».

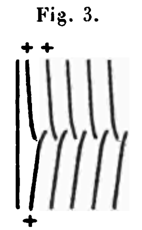
Dans l'explication du trait lumineux M. Hemsalech admet donc que l'incandescence de l'air entre les électrodes est due à la haute température provoquée par le passage de l'électricité à travers la couche d'air. Ce serait un phénomène comparable à l'incandescence d'un fil fin conducteur traversé par un courant. Cette explication nous paraît inadmissible parce que, d'abord, les corps incandescents ne fournissent jamais un spectre de raies, mais toujours un spectre continu; ensuite la luminescence des gaz provoquée par des oscillations électriques peut ne pas être accompagnée d'un grand dégagement de chaleur. En outre, comme nous avons signalé au n° 3, la vapeur du mercure bouillant dans le vide est luminescente, et pourtant sa température est inférieure à celle des corps incandescents. Il faut donc admettre que l'effet thermique de l'étincelle est corrélatif à l'effet lumineux sans en être la cause.

Quoi qu'il en soit, la différence entre le trait lumineux et l'auréole de l'étincelle est établie d'une façon évidente par les expériences de MM. Schuster et Hemsalech. Les particularités de l'auréole ressortent davantage dans une étincelle oscillante.

9. Lorsqu'une self-induction est intercalée dans le secondaire d'une bobine d'induction, les oscillations de l'étincelle deviennent régulières, mais elle est toujours constituée par un trait lumineux et une auréole. Cependant, le trait lumineux de la décharge initiale devient très pâle, tandis que l'auréole gagne en clarté; ensuite, la vapeur métallique remplit tout l'espace entre les deux électrodes, et l'on ne voit au spectroscope que les raies métalliques. L'étincelle oscillante ne fournit donc pas de

spectre de l'air. Si nous examinons une photographie d'une décharge oscillante de M. Hemsalech (*fig.* 3), nous

Fig. 3.



constaterons d'abord que le trait lumineux, rectiligne, joint les deux pôles comme si tous ses points étaient devenus lumineux au même moment. Ce trait ne se produit qu'une seule fois pendant une décharge. Les oscillations suivantes ont lieu dans l'auréole et la constituent. Elles sont de plus en plus espacées, et d'après l'allure de chaque trait on peut conclure que la vitesse initiale des particules lancées par les électrodes est telle que le temps qu'elles mettraient à parcourir l'espace entre les deux électrodes serait égal à l'intervalle qui sépare deux oscillations consécutives. En effet, la partie initiale de chaque trait est rectiligne et, si on la prolongeait jusqu'au pôle opposé, on arriverait au point de départ du trait suivant. On peut en conclure que le courant électrique dans l'auréole est un courant alternatif de convection.

Il résulte donc du travail de MM. Schuster et Hemsalech, que le trait lumineux est la phase initiale de la décharge, tandis que l'auréole se forme à la suite de ce premier phénomène et lorsque les propriétés du gaz en sont profondément altérées. Dans toutes les recherches sur l'étincelle électrique, où l'on n'emploie pas le procédé de Feddersen ni celui de MM. Schuster et Hemsalech, le trait lumineux est entièrement masqué par l'auréole, de sorte qu'on considère en général la décharge disruptive comme un courant de convection.

M. Schuster (1) et M. Giesel (2), chacun de son côté, ont proposé une théorie électrolytique de la décharge électrique. Dans la théorie nouvelle de J.-J. Thomson, ce sont les ions différents de ceux de l'électrolyse qui transportent le courant électrique dans les deux sens. Cette dernière théorie est basée sur les faits observés dans les tubes évacués et dans les gaz ionisés par les différentes radiations. Ces recherches ont commencé par les brillantes expériences de Hittorf.

10. Hittorf (3) a continué les expériences de Faraday sur la décharge électrique dans les gaz raréfiés. Il a étudié la conductibilité des gaz sous des pressions différentes et il a constaté que leur résistance diminue d'abord, passe par un minimum au voisinage de 1^{mm} de mercure, pour commencer à croître ensuite indéfiniment. Il a constaté ensuite qu'à des pressions très basses un espace obscur se forme autour de la cathode (espace obscur de Hittorf), qui oppose une résistance très forte à la décharge, et que le gaz, traversé par une décharge, laisse passer le courant d'une pile. Il a observé en outre les mouvements de la matière dans les tubes à gaz raréfié et il a supposé que la décharge est accompagnée d'un transport des particules gazeuses du pôle positif vers le pôle négatif. Ce mouvement des particules est empêché dans l'espace obscur entourant la cathode, ce qui augmente la résistance du tube.

Cette découverte a servi de point de départ aux travaux de Goldstein et de Crookes qui ont découvert et étudié les rayons cathodiques. Ces rayons matériels qui prennent naissance sur la cathode repoussent le flux gazeux anodique, ce qui rend la décharge plus difficile, et, lorsque l'anode est introduite dans l'espace obscur, la décharge ne passe plus.

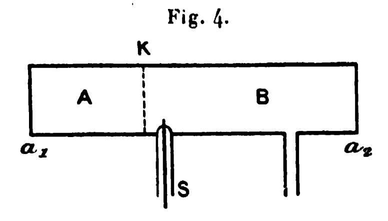
---

(1) *Proc. R. soc. of. London*, 1890.
(2) *Wied. Annal.*, 1889.
(3) *Pogg. Annal.*, t. CXIX, 1863; t. CXXXIV, 1869.

Mes expériences, ainsi que celles de M. E. Salles ([1]), ont démontré que le flux anodique est repoussé par les rayons cathodiques, comme par un souffle dont l'énergie cinétique est supérieure à celle du flux anodique.

Les expériences récentes de M. Schmidt ([2]) confirment ce résultat. Une ampoule est fermée avec deux anodes a_1 et a_2 (*fig.* 4), entre lesquelles, à une distance de 4^{cm} de a_1 et de 15^{cm} de a_2, se trouve une cathode k en toile métallique. Les rayons-canaux produits par a_1 pénètrent dans l'espace obscur du compartiment B, et les rayons-canaux produits par a_2 pénètrent dans A. Il s'ensuit que

Fig. 4.



l'espace où se trouve la sonde s, et qui est obscur lorsque l'anode a_1 est supprimée, devient lumineux; la *chute cathodique* devient faible et la résistance du tube diminue d'une façon considérable. La matière des rayons-canaux alimente les deux espaces obscurs des deux côtés de la cathode et y détruit le vide qui s'y forme grâce à la répulsion du flux anodique par les rayons cathodiques.

Il résulte de ces expériences que la résistance de l'espace obscur de Hittorf est due à l'absence dans cette région de particules matérielles qui en sont chassées par les rayons cathodiques. L'intérêt pour les phénomènes de la décharge électrique dans les gaz raréfiés excité par les expériences de Hittorf a fait abandonner les investigations de l'étincelle électrique dont les spectroscopistes seuls

([1]) *Comptes rendus*, 1903.
([2]) *Drud. Ann.*, t. XII, 1903, p. 622.

continuaient à s'occuper, mais uniquement dans le but d'étudier les spectres de divers éléments. De cette façon, dans l'intervalle de plus de 30 ans qui sépare les expériences de Feddersen de celles de MM. Schuster et Hemsalech, rien n'a été fait au sujet de cette question, et les résultats obtenus par ces derniers n'ont pas empêché d'envisager la décharge électrique au seul point de vue de la convection électrique grâce à certaines apparences observées dans les tubes évacués. C'est ainsi que M. J.-J. Thomson, en discutant les expériences de MM. Schuster et Hemsalech au point de vue de la théorie des ions (¹), ne s'occupe que des phénomènes observés dans l'auréole de l'étincelle et n'attache aucune importance au trait lumineux qui est pourtant la phase principale de la décharge.

11. Les phénomènes mécaniques au sein d'un gaz sous l'influence des forces électriques furent étudiés par M. Bichat (²), qui a constaté qu'à des conditions déterminées le mouvement d'une pointe suspendue librement commence à partir d'une certaine valeur de différence de potentiel, qui est constante pour ces conditions et qu'il a appelée *potentiel du départ*. Le potentiel du départ est fonction du signe de la charge électrique, du diamètre de la pointe, de la nature du gaz et de sa pression. C'est ainsi que le fil métallique du *tourniquet électrique* de M. Bichat étant de $0^{mm},05$, le potentiel du départ pour la charge positive est de 69 unités C. G. S. quelle que soit la nature du métal employé; il est de 63 unités pour la charge négative, lorsque le fil est en platine ou en or, ou bien en métal oxydable, recouvert d'oxyde. Le potentiel du départ d'une pointe chargée négativement et non recouverte d'oxyde est inférieur à la constante indiquée ci-dessus, et varie suivant la nature du métal de la pointe. Mais lorsque le tourniquet

(¹) J.-J. Thomson, *Conduct. of. electr. through gases*, p. 396.
(²) *Ann. de Ch. et de Ph.*, 6ᵉ série, t. XII.

entre en mouvement, le fil s'oxyde et le potentiel monte pour atteindre sa limite qui est, dans le cas considéré, de 63 unités. Ainsi le *vent électrique* produit par un conducteur chargé négativement est accompagné d'une réaction chimique. Nous reviendrons ultérieurement (36) sur cette question à propos de quelques phénomènes qui se manifestent sur la cathode.

12. *La théorie corpusculaire des ions.* — Les mouvements au sein des gaz produits par des forces électriques ainsi que l'ensemble des phénomènes observés dans des tubes évacués ont suggéré la théorie balistique de la décharge électrique. Tout d'abord, c'est l'hypothèse électrolytique qui s'est imposée; les expériences de M. Crookes sur la décomposition de l'acide chlorhydrique dans un tube de Plücker, et les expériences de M. J.-J. Thomson sur l'électrolyse de la vapeur d'eau par une étincelle semblaient avoir donné raison à cette hypothèse. Le terme *ion* fut appliqué aux particules du gaz parcouru par un courant.

Mais la découverte des rayons X et l'étude des propriétés des gaz influencés par ces rayons, ont démontré que les gaz traversés par les rayons X, par les rayons ultra-violets ainsi que par une étincelle, possèdent les mêmes propriétés électriques. En même temps, on a constaté que les phénomènes *actino-électriques* ne sont presque jamais accompagnés d'une décomposition chimique des molécules du gaz. Il en est résulté que l'ionisation des gaz par ces agents n'est pas un phénomène analogue à une électrolyse liquide.

Une nouvelle théorie fut créée qui explique tous les phénomènes électriques dans les gaz ainsi que les propriétés des rayons cathodiques et des rayons α et β des substances radioactives. Cette théorie nous intéresse particulièrement parce que c'est la seule qui puisse expliquer certaines particularités de l'étincelle électrique, no-

tamment son auréole, et l'influence de certaines radiations qui favorisent la décharge électrique dans les gaz. Mais elle ne fournit aucun éclaircissement au sujet du trait lumineux de l'étincelle, qui est la phase principale de la décharge.

Le point de départ de cette théorie est la découverte du *corpuscule* par M. J.-J. Thomson, dont le rapport $\frac{e}{m}$ est 1000 fois plus grand que celui d'un ion d'hydrogène dans l'électrolyse liquide. Les expériences de Zeemann ont fourni la même valeur pour l'électron de Lorentz. Cette concordance remarquable constitue une preuve de l'existence réelle de quelque chose, soit de l'électron, soit du corpuscule, qui est mille fois plus petit que la plus petite unité de matière, réputée jusqu'à présent indestructible.

M. J.-J. Thomson considérait d'abord le corpuscule comme une petite fraction de l'atome, d'essence matérielle (1). Mais il a changé d'opinion et il suppose actuellement que le corpuscule est l'unité naturelle et indestructible du fluide électrique, dont les propriétés sont différentes de celles de la matière ordinaire. En effet, dans le Rapport présenté au Congrès international de Physique, il dit : « L'étude du passage de l'électricité à travers les gaz conduit à reconnaître la possibilité de l'existence d'un nouvel état de la matière, qui ressemble aux trois autres états, solide, liquide et gazeux, en ce sens qu'il est constitué par un grand nombre de petites particules identiques, que nous appellerons *corpuscules,* mais qui diffère de la matière ordinaire, où les molécules ont des masses variables avec la nature de la substance, en ce que les corpuscules ont une masse invariable, de quelque substance qu'ils proviennent, et de quelque manière qu'on

(1) J.-J. Thomson, *La décharge électrique dans les gaz raréfiés,* trad. par M. Barbillon, 1900.

les ait produits, cette masse étant le millième environ de celle d'un atome d'hydrogène. Chacun de ces corpuscules porte une charge d'électricité négative. Il semble que ce soit toujours l'électricité négative que l'on trouve associée à la matière dans cet état, l'électricité positive semblant toujours s'attacher à la matière ordinaire » ([1]).

Mais, dans son dernier livre récemment paru, le corpuscule prend une autre signification physique : « The *electric fluid,* dit notamment M. J.-J. Thomson ([2]) corresponds to an assemblage of corpuscles, negative electrification consisting of a collection of these corpuscles : the transference of electrification from place to place being a movement of corpuscles from the place where there is a gain of positive electrification to the place where there is a gain of negative. Thus a positively electrified body is one which has been deprived of some corpuscles. »

De cette façon, le corpuscule est l'atome du fluide électrique, et la matière dans l'état neutre est une combinaison de la matière inerte avec les corpuscules de l'électricité. Une répulsion s'exerce entre les corpuscules, qui est équilibrée par l'attraction existante entre ces derniers et la matière.

L'ensemble des corpuscules dans un corps donné obéit, d'après J.-J. Thomson, aux lois de la théorie cinétique des gaz. C'est une sorte de gaz parfait, remplissant sous une pression, qui dépend de la nature du corps considéré, le volume occupé par ce corps. Abandonné à ses propres forces intérieures, le fluide électrique ne se manifeste par aucune action extérieure, mais, lorsqu'on chauffe le corps, l'énergie cinétique des corpuscules augmente, et, quand elle dépasse une certaine valeur, les corpuscules peuvent sortir dans le gaz ambiant, en y produisant une ionisation

---

([1]) *Rapports présentés au Congrès international de Physique* t. III, 1900, p. 139.

([2]) *Conduct. of electr. through gases.* Cambridge, 1903, p. 131.

avec excès de charge négative. En même temps, le corps peut subir des modifications physiques et chimiques.

En effet, imaginons-nous une molécule constituée par deux atomes : A élément positif et B négatif. Sous l'influence de la température, l'énergie des corpuscules croît, dépasse une certaine valeur, et la force d'attraction qui les retenait dans l'atome ne suffisant plus, ils lâchent d'abord l'élément négatif, qui perd ainsi sa charge négative. L'attraction qui existait entre A et B en vertu de la différence de leur état électrique diminue, et la molécule se scinde. Les corpuscules libres peuvent s'unir avec l'atome A, le lâcher ensuite pour revenir vers B, et ainsi de suite. A chaque ensemble de conditions données correspondra un état d'équilibre, pour lequel le nombre de molécules brisées par unité de temps sera égal au nombre de recombinaisons. Les conditions de cet état d'équilibre doivent dépendre de la facilité avec laquelle les atomes A et B se combinent avec les corpuscules, de la force de leur liaison et de la température absolue du corps.

13. Lorsque les corpuscules libres se meuvent dans le gaz avec une certaine vitesse, il peut en résulter une ionisation de ce gaz. Les molécules neutres, sous le choc des corpuscules, perdent leurs corpuscules. Des quantités égales d'électricité positive et d'électricité négative sont libérées au sein du gaz, distribuées sur les ions des deux signes. Les ions positifs sont des molécules privées de leurs corpuscules, et les ions négatifs sont ces corpuscules libres. Ces ions élémentaires servent de noyaux de condensation aux molécules neutres qui sont attirées par les ions des deux espèces, en formant des groupements plus compliqués. C'est par l'intermédiaire de ces ions simples ou complexes que la charge électrique d'un conducteur se trouvant entouré de gaz ionisé est transportée sur tous les corps voisins.

La décharge électrique dans les gaz raréfiés, l'effluve et

l'étincelle ne seraient que des aspects différents du même phénomène de transport de l'électricité d'un conducteur à l'autre au moyen des ions de deux signes.

Nous allons examiner brièvement les faits qui ont servi de base à cette hypothèse, et son application à la théorie de la décharge électrique.

14. La notion du corpuscule est née de l'étude des rayons cathodiques. M. J. Perrin (¹) a établi que les rayons cathodiques portent une charge négative. M. J.-J. Thomson (²) a modifié la méthode de M. Perrin en faisant pénétrer dans un cylindre de Faraday un faisceau de rayons cathodiques déviés par l'aimant. Ce cylindre, protégé par un cylindre extérieur en communication avec le sol, portait en outre une soudure fer-cuivre d'une pince thermo-électrique. Un électromètre mesurait la charge négative reçue par le cylindre intérieur. Soit N le nombre de particules matérielles entrées dans ce cylindre, e la charge électrique et m la masse de chacune d'elles; Q la quantité d'électricité recueillie dans le cylindre; w le travail correspondant à la quantité de chaleur développée dans la soudure; v la vitesse des rayons cathodiques. On a deux relations suivantes :

$$Ne = Q, \tag{1}$$

$$\frac{1}{2} N m v^2 = w. \tag{2}$$

En outre, H étant le champ magnétique et ρ le rayon de courbure de la trajectoire des rayons cathodiques déviés,

$$H\rho = \frac{mv}{e}. \tag{3}$$

(¹) PERRIN, *Comptes rendus*, 1895, et PERRIN, *Rayons cathodiques et rayons de Röntgen*, Thèse, Paris, 1896.

(²) *Proc. Camb. Phil. Soc.*, t. IX, 1897.

De ces trois équations on déduit

$$(4) \qquad \frac{m}{e} = \frac{1}{2} Q \frac{H^2 \rho^2}{w}$$

et

$$(5) \qquad v = \frac{2w}{QH\rho}.$$

Les relations (4) et (5) déterminent les valeurs de $\frac{m}{e}$ et de v. D'après les expériences de M. Thomson $\frac{m}{e} = 10^{-7}$ et $v = 1,66 \times 10^9$.

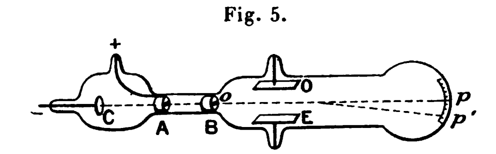
Ainsi v est environ 20 fois plus petit que la vitesse de la lumière.

De la valeur $\frac{m}{e}$ on déduit $\frac{e}{m} = 10^7$, qui est mille fois plus grand que le rapport analogue pour l'hydrogène dans l'électrolyse.

Une autre méthode ([1]), qu'on peut appeler *méthode de zéro,* fournit un moyen de mesurer directement la vitesse des rayons cathodiques.

Un faisceau de rayons cathodiques OP (*fig.* 5), passés

Fig. 5.



à travers deux fentes A et B perpendiculaires entre elles, est soumis à l'action simultanée d'un champ magnétique et d'un champ électrostatique antagonistes. L'immobilité de la tache fluorescente sur la paroi pp' indique que les deux actions sont égales entre elles. Dans ces conditions, Y étant le champ électrostatique et H le champ magné-

([1]) J.-J. Thomson, *Philos. Mag.,* t. XLIV, 1897, p. 293, et *Cond. of electr. through gases,* p. 91.

tique, on a $Ye = Hev$, d'où

$$v = \frac{Y}{H}.$$

D'un autre côté, lorsque les rayons cathodiques sont soumis seulement à l'action du champ magnétique, on a

$$\frac{mv}{e} = H\rho.$$

D'après le déplacement pp' de la tache fluorescente et en connaissant la longueur Bp, on calcule facilement ρ.

Les expériences exécutées dans ces conditions dans l'air, dans l'hydrogène et dans l'acide carbonique ont fourni les mêmes valeurs de $\frac{e}{m}$ et de v :

$$\frac{e}{m} = 7,7 \times 10^6 \qquad \text{et} \qquad v = 3 \times 10^9.$$

15. *Mesure de e en valeur absolue.* — Le rapport $\frac{e}{m}$ une fois déterminé, une question se posait : quelle est la raison de la différence entre ce rapport et le rapport analogue de l'atome d'hydrogène dans l'électrolyse? Deux solutions pouvaient se présenter, à savoir : ou la masse d'une particule des rayons cathodiques est mille fois plus petite que celle d'un atome d'hydrogène, ou bien sa charge est mille fois plus grande que celle de l'atome d'hydrogène. Pour résoudre cette question, M. J.-J. Thomson (1) a fait une série d'expériences, d'après la méthode inventée par M. C.-T.-R. Wilson, et dont le but était de mesurer e. M. Wilson a trouvé qu'en faisant détendre le gaz ionisé (2) et saturé de vapeur d'eau, celle-ci se condense seulement sur les ions négatifs si le rapport du volume final du gaz à son volume initial est entre 1,25 et 1,31. En mesurant

(1) J.-J. Thomson, *Philos. Mag.*, t. XLVI, 1898, t. XLVIII, 1899 et J.-J. Thomson, *loc. cit.*, p. 121.

(2) Langevin, *Recherches sur les gaz ionisés*, Paris, 1902.

la vitesse avec laquelle descend le petit nuage formé dans ces conditions, en déterminant son poids et sa charge électrique, M. J.-J. Thomson détermine le nombre d'ions négatifs entraînés par le nuage et leur charge électrique totale, d'où par simple division se déduit la charge d'un seul ion négatif.

Quelle que soit la source d'émission des rayons cathodiques et la méthode employée pour la mesure du rapport $\frac{e}{m}$, sa valeur reste constante aux erreurs d'expériences près, comme on peut voir d'après le Tableau ci-dessous emprunté au travail de M. J.-J. Thomson :

I. *Rayons cathodiques de Crookes :*

	$\left(\frac{e}{m}\right)$.
1re méthode de J.-J. Thomson.....	$1,17 \times 10^7$
2e » » »	$7,7 \times 10^6$
Kauffmann........................	$1,86 \times 10^7$
Simon............................	$1,865 \times 10^7$
Wiechert.........................	$1,55 \times 10^7$
	$1,01 \times 10^7$

II. *Rayons de Lenard :*

1re méthode de Lenard...............	$6,39 \times 10^6$
2e » »	$6,8 \times 10^6$

III. *Rayons cathodiques des métaux sous l'action des radiations ultra-violettes :*

J.-J. Thomson.......................	$7,6 \times 10^6$
Lenard..............................	$1,15 \times 10^7$

IV. *Émission des métaux incandescents :*

J.-J. Thomson.......................	$8,7 \times 10^6$

V. *Rayons β du radium :*

H. Becquerel..........................	7×10^7

En expérimentant de la sorte, M. Thomson a trouvé

$$e = 3,4 \times 10^{-10} \text{ unités électrostatiques.}$$

Or, d'après les expériences de M. Townsend, un atome d'hydrogène dans l'électrolyse porte une charge

$$E = 3,1 \times 10^{-10} \text{ unités.}$$

L'accord est tout à fait surprenant, et il prouve que la masse d'une particule des rayons cathodiques est mille fois plus petite que celle d'un atome d'hydrogène. C'est cette particule qui a reçu le nom de *corpuscule*.

16. Les rayons cathodiques, les rayons X et autres agents capables de rendre les gaz conducteurs y produisent une libération de quantités égales d'électricité positive et négative. D'après la théorie de M. J.-J. Thomson, ces agents ont pour effet de mettre en liberté une partie des corpuscules que contiennent les molécules neutres. Comme cela a été dit, les corpuscules constituent les ions négatifs et les molécules qui les ont perdus, les ions positifs. Des molécules neutres attirées par ces ions les entourent, mais le nombre de molécules qui peuvent former un groupe avec un ion est limité par la force d'attraction de celui-ci. D'après M. Langevin (1) ce nombre doit être inférieur à 7, de sorte qu'un ion élémentaire ne peut être entouré que d'une seule couche de molécules neutres.

Étant donné que le centre négatif est un corpuscule, tandis que le centre positif est un atome de matière, les ions négatifs seront toujours plus petits que les ions positifs formés dans les mêmes conditions, par suite, leur mobilité est différente. La différence de vitesse que possèdent les ions positifs et négatifs d'un gaz, ionisé par les rayons X, soumis à un champ électrique, fut découverte en 1898 par M. Zeleny (2), qui a trouvé que les ions négatifs ont une vitesse supérieure à celle des ions positifs. Si v_1 est la vitesse des premiers et v_2 la vitesse des seconds, le rap-

(1) LANGEVIN, *Recherches sur les gaz ionisés*, 1902, p. 45.
(2) *Philosoph. Mag.*, XLVI, 1898.

port $\frac{v_1}{v_2}$ est sensiblement le même pour l'air, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote; il est voisin de 1,25. La vitesse absolue pour les mêmes conditions de température et de pression est proportionnelle au champ. Soit X la valeur du champ, établi au sein d'un gaz, on a $v_1 = K_1 X$ et $v_2 = K_2 X$. Les coefficients K_1 et K_2 sont des coefficients de *mobilité* des ions.

17. M. C.-T.-R. Wilson ([1]) a trouvé que les métaux fournissent des noyaux de condensation pour la vapeur d'eau dans un gaz soumis à une détente brusque. M. Wilson range les métaux d'après leur pouvoir ionisant dans le même ordre qu'on peut les ranger d'après leur pouvoir d'impressionner les plaques photographiques. L'écrasement des gouttes qui tombent sur une surface a le même effet ionisant; les bulles d'air passant sous une pression à travers une couche d'eau sont ionisées; et, en général, « toute action mécanique sur la surface d'un grand nombre de substances, dit M. J.-J. Thomson ([2]), est accompagnée d'une production d'ions dans le gaz ambiant : l'explication la plus naturelle de ce fait est qu'une mince couche de gaz ionisé adhère toujours à la surface de ces corps et que cette couche se détache sous l'action de toute cause mécanique ». C'est la couche double de Helmholtz sous un aspect plus tangible. En effet, le gaz ionisé est un gaz où, sous l'influence d'une cause quelconque, sont libérées des quantités égales d'électricité de deux signes portées par des ions. La charge électrique totale d'un gaz ionisé est nulle. Il y a donc dans la couche de gaz ionisé entourant chaque corps des quantités égales d'électricité de deux signes. Toute cause mécanique est capable d'arracher cette enveloppe ionisée, et les ions mis ainsi en liberté se dissipent dans le gaz am-

---

([1]) *Philos. Transact.*, 1899.
([2]) J.-J. Thomson, *Loc. cit.*, 1903, p. 142.

biant en le rendant plus ou moins conducteur d'électricité.

Il est beaucoup plus difficile de détacher cette couche par une force électrique. En effet, la charge d'un ion e, le plus voisin de la surface métallique considérée, y produit par induction une charge égale et de signe contraire. La force attractive qui en résulte est $\frac{e}{4r^2}$ si r est la distance entre cet ion et la surface du métal. Or, pour qu'une force électrique externe f puisse le détacher, il faut qu'on ait

$$f > \frac{e}{4r^2}.$$

Mais $e = 3,4 \times 10^{-10}$, et, si nous admettons $r = \frac{1}{3} \times 10^{-6}$ qui est la distance moyenne entre les molécules d'après la théorie cinétique des gaz, nous aurons

$$f > 765 \text{ unités électrostatiques,}$$

c'est-à-dire que le champ doit être supérieur à

$$765 \times 300 = 2,295 \times 10^5 \text{ volts par centimètre.}$$

M. F. Earhart (1) a réussi à obtenir des étincelles dont la longueur était de l'ordre de grandeur des ondes lumineuses. D'après la formule ci-dessus, on peut calculer la différence de potentiel critique par laquelle la décharge devrait passer parce que les ions de la couche double détachée des électrodes auraient servi de véhicules à l'énergie électrique.

En effet, supposons que la distance explosive soit égale à 3×10^{-5}. Le potentiel critique aura pour valeur

$$V = 229500 \times 3 \times 10^{-5} = 6,88 \text{ volts.}$$

L'expérience a fourni à M. Earhart, pour cette dis-

(1) *Philos. Mag.*, 2e série, t. I, 1901.

tance explosive, une valeur de différence de potentiel $V = 32$ volts. L'écart est sensible. Mais, si nous calculons d'après cette donnée expérimentale la distance r de la surface métallique à l'ion le plus proche, nous aurons

$$\frac{V}{300 \times d} = \frac{e}{4r^2},$$

où d est la distance explosive, e la charge d'un ion,

$$r = \sqrt{\frac{e\,d \times 300}{4V}}$$
$$= \left(\frac{3 \times 10^{-10} \times 3 \times 10^{-5} \times 300}{4 \times 32}\right)^{\frac{1}{2}} = 0,15 \times 10^{-6} \text{ centimètres.}$$

Cette valeur est plus de deux fois moindre que celle donnée par la théorie cinétique des gaz pour la distance moyenne entre les molécules gazeuses. Il faut donc supposer que la couche du gaz ionisé adhérente à la surface métallique est plus dense que le reste du gaz ambiant.

M. Earhart a trouvé, en outre, que, pour les distances explosives inférieures à 1×10^{-4} centimètres, l'influence de la pression du gaz diminue d'une façon remarquable, de telle sorte que, pour une distance de l'ordre de 1×10^{-5} centimètres, la différence de potentiel critique est à peu près la même pour les écarts de pression variant de 15^{cm} à 3^{at} (¹). Cela prouve que, pour ces distances explosives, toute la résistance du gaz est réduite à la résistance de la couche double adhérente aux deux électrodes.

M. Bouty (²) a trouvé, de son côté, que la couche gazeuse adhérente aux parois du ballon se trouvant entre les plateaux d'un condensateur plat influe sur la différence de potentiel explosif. M. Bouty a constaté, en outre, que l'influence de cette couche varie suivant la

(¹) EARHART, *loc. cit.*
(²) E. BOUTY, *Bull. de la Soc. de Phys.*, 1903, p. 116 et suiv.

nature du gaz, sa pression et la nature de la substance à laquelle adhère la couche.

18. Il y a donc à considérer, dans une décharge, deux cas différents selon que la résistance de la couche adhérente aux électrodes est prédominante dans la résistance totale, ce qui a lieu pour les très petites distances explosives, ou que cette résistance constitue une faible partie de la résistance totale, c'est le cas le plus général.

Dans ce dernier cas, comme cela a été dit au numéro précédent, le champ créé par la différence de potentiel explosif ne suffit plus pour détacher de la surface des électrodes la couche adjacente du gaz ionisé. En effet, M. Earhart a trouvé que la distance explosive étant de $0^{mm},1$, la différence de potentiel nécessaire à l'étincelle sous la pression atmosphérique est de 1000 volts. L'intensité du champ est donc $\frac{1000}{300 \times 10^{-2}} = \frac{1}{3} \times 10^3$ unités électrostatiques. Mais, en supposant la distance r d'un ion à la surface de l'électrode $= 0,15 \times 10^{-6}$, le champ minimum capable de le détacher de cette surface est

$$f = \frac{e}{4r^2} = \frac{3,4 \times 10^{-10}}{4 \times \overline{0,15}^2 \times 10^{-12}} = \frac{3,4 \times 10^3}{9} = \frac{1}{2,6} \times 10^3,$$

c'est-à-dire $f > \frac{1}{3} \times 10^3$. Ainsi donc, la distance explosive étant de $0^{mm},1$ ou plus grande, la décharge électrique ne s'effectue pas par l'intermédiaire des ions de la couche du gaz ionisé adhérent aux électrodes.

19. M. J.-J. Thomson suppose que les gaz en général contiennent toujours une certaine quantité d'ions libres ou de corpuscules. Lorsqu'on établit une différence de potentiel entre deux conducteurs séparés par une couche gazeuse, les ions positifs se dirigeront vers le pôle négatif et les ions négatifs vers le pôle positif. Ce courant invisible durera un temps fini, si le système en question est à l'abri de toute cause extérieure d'ioni-

sation. Sa limite est déterminée par la neutralisation de tous les ions transportés sur les deux pôles. Pour que le courant puisse durer, il faut que les ions en mouvement soient capables de produire de nouveaux ions.

Soit X le champ, l le libre parcours moyen d'un ion, e sa charge; l'énergie cinétique acquise par cet ion au bout de sa course libre est Xel; lorsque cette énergie est suffisamment grande, certaines collisions donneront lieu à la production de nouveaux ions; soit $f(Xel)$ la quantité de collisions qui donneront des ions; elle est nulle lorsque aucun ion ne se produit. Si n est le nombre d'ions par centimètre cube et v leur vitesse moyenne, il se produira $\frac{nv}{l}$ collisions par unité de temps, et la quantité de nouveaux ions $\frac{nv}{l}f(Xel)$ par unité de temps et de volume. Certains ions dans leur rencontre se recombinent, de sorte qu'ils ne prennent plus part au transport du courant. Soit β la fraction des collisions qui auront pour effet ce résultat. Le nombre d'ions ainsi disparus dans l'unité de volume et par unité de temps sera $\frac{\beta nv}{l}$. La quantité d'ions libres sera donc $\frac{nv}{l}[f(Xel) - \beta]$.

Si, avant l'établissement du courant, u était la vitesse des ions, nu était leur nombre par unité de volume. Sous l'influence du champ électrique ce nombre subira une variation $\frac{d(nu)}{dx}$, et, en admettant que dans ce cas $u = v$, nous aurons

$$\frac{d(nu)}{dx} = \frac{nu}{l}[f(Xel) - \beta], \tag{1}$$

soit

$$\frac{f(Xel)}{l} = \alpha; \tag{2}$$

c'est la quantité d'ions que produit un ion sur un parcours égal à 1^{cm}.

Nous aurons

$$\frac{d}{dx}(nu) = nu\left(\alpha - \frac{\beta}{l}\right),$$

d'où

$$nu = Ce^{\left(\alpha - \frac{\beta}{l}\right)x}, \tag{3}$$

où $C = nu$, lorsque $x = 0$.

Lorsque le champ est suffisamment intense pour que les corpuscules puissent arriver sur l'anode sans se recombiner avec les ions positifs, $\beta = 0$ et

$$nu = Ce^{\alpha x}. \tag{4}$$

C'est la quantité d'électricité négative qui traverse dans l'unité de temps l'unité de surface à une distance x de l'anode. M. Townsend a mesuré cette quantité pour des valeurs variées de différence de potentiel et de pression, et il a trouvé que α croît avec la pression, passe par un maximum et diminue ensuite. Ce maximum est d'autant plus grand que la différence de potentiel est plus élevée.

D'après la formule (2) α est fonction du libre parcours moyen l. Lorsque chaque collision donne lieu à la production d'ions nouveaux, $f(Xel) = 1$ et $\alpha = \frac{1}{l}$, c'est-à-dire que le nombre d'ions produits est égal à l'inverse du chemin moyen.

Or, on a pour le maximum de α

$$\frac{d\alpha}{dl} = 0$$

ou

$$\frac{f'(Xel)Xe}{l} - \frac{f(Xel)}{l^2} = 0,$$

$$(Xel)f'(Xel) = f(Xel),$$

d'où

$$Xel = \frac{f(Xel)}{f'(Xel)}.$$

Donc, α étant maximum, Xel est indépendant du produit Xl, c'est-à-dire que l est inversement proportionnel à X, et, comme l est aussi inversement proportionnel à la pression, la différence de potentiel explosif doit varier proportionnellement à la pression. On voit par ce qui vient d'être dit que la décharge, étant fonction de la pression, de la distance explosive et du parcours libre moyen des molécules, est indépendante de la température et de la nature des électrodes. Elle n'est donc pas un phénomène analogue à l'électrolyse. Elle ne dépend non plus de la substance des molécules, c'est leur parcours libre moyen qui intervient seul.

Ces vues théoriques, confirmées par beaucoup de faits expérimentaux, ne correspondent pas à quelques-uns des phénomènes observés et dont nous avions parlé précédemment. En effet, comme cela a été dit au n° 6, M. Hemsalech a trouvé que la nature du métal de l'électrode a une influence sur le spectre de lignes de l'air. L'intensité de ces raies varie beaucoup avec le métal qui constitue les électrodes; cette influence du métal sur les raies de l'air n'est pas la même pour toutes les raies : il y a des raies qui sont plus ou moins influencées que d'autres (¹). Il y a donc un facteur en plus de ceux que la théorie des ions prévoit pour expliquer la décharge électrique par étincelle. Comme il y a beaucoup de raisons de supposer que la lumière de l'étincelle n'est pas un effet uniquement de la température (*voir* n° 8), le spectre de l'étincelle électrique doit être considéré comme un des caractères distinctifs de la décharge au même titre que la différence de potentiel explosif et la pression critique.

20. Il existe entre la pression du gaz, la distance explosive et la différence de potentiel minimum une relation intime. M. Paschen (²) a trouvé que pour une même diffé-

(¹) Hemsalech, *loc. cit.*, p. 111.
(²) J.-J. Thomson, *loc. cit.*, p. 367.

rence de potentiel la distance explosive est inversement proportionnelle à la pression du gaz, c'est-à-dire

$$V = f(p\,d),$$

où p est la pression et d la distance explosive. Les investigations de M. Paschen ont porté sur les gaz : air, acide carbonique et hydrogène. Pour chacun d'eux le produit pd a une valeur particulière, mais constante dans les limites de pression étudiées par ce physicien, et qui variaient entre 10^{cm} et 75^{cm} de mercure.

D'un autre côté, M. Carr [1], dans un travail récent, a démontré que le produit de la *pression critique* de la décharge par la *distance explosive critique* est constant. M. Carr appelle *pression critique* la pression pour laquelle la résistance d'un tube à gaz raréfié est minimum. On connaît, en effet, d'après les travaux de Hittorf, que la résistance d'un tube à gaz raréfié diminue avec la raréfaction jusqu'à une certaine limite, après laquelle elle croît avec la diminution de pression. M. Carr appelle cette limite de pression *pression critique*. Quant à la distance explosive critique, c'est la distance explosive correspondant au minimum de potentiel de décharge. Il existe, en effet, un minimum de potentiel de décharge pour les distances explosives supérieures à 10^{-4} cm. : en diminuant la distance explosive, le potentiel de décharge diminue selon la formule

$$V = a + bd \text{ [2]},$$

où a et b sont des constantes et d la distance explosive. Mais, à partir d'une certaine distance, variable avec la pression du gaz, le potentiel explosif recommence à croître. Cependant, comme nous avons vu ci-dessus (17), à des distances inférieures à 10^{-4} cm., le potentiel explosif

(1) *Proc. R. S.*, t. LXXI, 1903.
(2) Baille, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 1883.

décroît rapidement. Il y a donc une distance explosive critique supérieure à 10^{-4} cm., pour laquelle le potentiel de décharge est minimum. M. Carr a trouvé que le produit *pd* de cette distance critique par la pression critique est constant pour un gaz donné et variable d'un gaz à l'autre.

M. J.-J. Thomson a remarqué que le rapport du produit *pd* au chemin moyen des molécules gazeuses a la même valeur pour tous les gaz [1]. Il est égal à

$$\frac{pd}{l} = 1,3 \times 10^{-6},$$

aux erreurs d'expérience près.

Il en résulte, d'après M. J.-J. Thomson, que c'est la distance entre les molécules qui détermine l'individualité de chacun des gaz au point de vue des phénomènes électriques.

21. M. E. Bouty a démontré que la *cohésion diélectrique* des gaz est une propriété moléculaire indépendante de toutes les causes extérieures, si la quantité de gaz reste constante. Elle est mesurée par la constante b de la pression dans la valeur limite du champ critique [2] exprimé par la formule suivante :

$$y = A + bp.$$

Étant donné qu'il y a identité entre les différences de potentiel critique limites d'effluve et d'étincelle [3], la différence de potentiel explosive sera

$$V = yd = Ad + bpd.$$

M. J.-J. Thomson met cette formule sous la forme sui-

---

(1) J.-J. Thomson, *loc. cit.*, p. 369.
(2) *Bul. de la Soc. franç. de Phys.*, 1903, p. 124.
(3) *Ibid.*

vante (¹) :

$$V = k + f\left(\frac{d}{l}\right),$$

où f exprime une fonction de la même forme pour tous les gaz.

La différence de potentiel explosive se trouve ainsi exprimée en fonction de la distance explosive et du libre parcours des molécules, k étant une constante.

22. D'après l'exposé qui vient d'être fait, le mécanisme de la décharge électrique dans les gaz serait le suivant : Lorsqu'on établit une différence de potentiel entre deux électrodes séparées par une couche gazeuse, les ions des deux signes se dirigent sur les pôles contraires. Si la vitesse de ces ions n'est pas suffisante pour produire dans le gaz de nouveaux ions, le courant s'arrête dès que tous les ions présents dans le gaz seront transportés sur les pôles. Mais lorsque l'intensité du champ est assez grande pour que l'énergie cinétique communiquée aux corpuscules ainsi qu'aux ions positifs soit suffisante pour la production d'ions nouveaux, la décharge continuera aussi longtemps que l'énergie du circuit sera suffisante pour maintenir l'ionisation du gaz.

23. Les ions positifs arrivant sur la cathode provoquent par leur bombardement un dégagement de corpuscules, soit de la couche du gaz ionisé adhérent à sa surface, soit du métal lui-même. Les corpuscules, partant de la cathode, constituent les rayons cathodiques, dont le parcours sous la pression atmosphérique ne dépasse pas les dimensions du libre parcours des molécules. Ils provoquent dans la couche voisine une nouvelle ionisation accompagnée d'une luminescence connue sous le nom de *gaine négative* ou *lumière négative,* qui s'éloigne de plus en plus de la cathode lorsque la pression du gaz diminue et

(¹) THOMSON, *loc. cit.*, p. 382.

que l'énergie et le libre parcours des corpuscules augmentent. Il apparaît alors un espace obscur entre la cathode et la gaine négative lumineuse, appelé *espace obscur de Hittorf* (10).

Cette origine des rayons cathodiques provoqués par le bombardement de la cathode par les ions positifs fut prouvée par les expériences de M. P. Villard sur l'*afflux cathodique* ([1]) qui, pour ainsi dire, alimente la source d'émission cathodique, et par les expériences de M. Schuster et M. Wehnelt qui ont constaté qu'un obstacle solide placé sur le chemin de l'afflux cathodique projette une ombre sur la cathode et que cette ombre n'émet pas de rayons cathodiques.

Tels sont les phénomènes qui se produisent au voisinage de la cathode, lors d'une décharge électrique.

24. Le pôle positif devient le siège de phénomènes tout à fait différents.

Les ions positifs se trouvant à son voisinage sont repoussés et les ions négatifs attirés. Lorsque le champ est suffisamment fort, les ions positifs ont une énergie cinétique suffisante pour la production d'ions nouveaux et, de collision à la collision suivante, l'électricité positive est transportée le long du chemin qui sépare les deux électrodes, tandis que les ions négatifs cheminent dans le sens contraire vers le pôle positif.

Un ion produit dans un choc deux ions nouveaux. Chacun de ces derniers en produit autant. Le nombre d'ions croît en progression géométrique et la quantité d'électricité qu'ils transportent augmente de la même façon. Il en résulte un abaissement accéléré de différence de potentiel entre les deux pôles, et partant un affaiblissement du champ. Comme la vitesse des ions est proportionnelle au champ, l'affaiblissement de ce dernier aura pour effet une

([1]) P. Villard, *Les rayons cathodiques*, 1900, p. 93.

diminution de l'énergie cinétique des ions qui ne pourront plus produire d'ions nouveaux. La décharge sera arrêtée.

Mais tous les ions ne se dirigent pas en ligne droite d'un pôle à l'autre, ils suivent la direction de toutes les lignes des forces créées par le champ. Il en résulte une dispersion d'ions dans l'espace environnant. Outre cette cause de diminution du nombre d'ions qui prennent part au transport du courant électrique, il y en a une autre, c'est la recombinaison des ions de signes contraires.

25. M. Langevin [1] a démontré que le nombre des recombinaisons des ions de signes contraires est d'autant plus grand que le champ électrique dans lequel ils se meuvent est plus faible. Le rapport du nombre des recombinaisons au nombre des collisions entre des ions de signes contraires reste toujours inférieur à l'unité et s'en rapproche d'autant plus que la mobilité des ions est plus faible.

Grâce à cette propriété des ions, un équilibre s'établit entre la valeur du champ et le nombre de nouveaux ions produits. En effet, nous avons vu au numéro précédent que, les ions une fois mis en état d'ioniser le gaz ambiant, leur nombre croît en progression géométrique, ce qui entraîne un affaiblissement de l'intensité du champ. Mais, le champ devenant plus faible, le nombre de recombinaisons augmente, ce qui diminue le nombre d'ions libres pouvant charrier le courant électrique.

26. Avant le moment où s'établit cet équilibre, le courant de décharge passe par un état variable. Le champ électrique créé par la différence de potentiel entre les électrodes fait mouvoir les ions existant dans le gaz qui les sépare; ces ions créent de nouveaux ions, et ainsi de suite jusqu'au moment où leur nombre devient assez

---

(1) LANGEVIN, *Recherches sur les gaz ionisés*. Thèse. Paris, 1902, Chapitre V.

grand pour produire la décharge brusque par étincelle. Toute étincelle doit donc être précédée d'un *retard* qui correspond au laps de temps pendant lequel le courant passe de zéro à un maximum déterminé par l'intensité du champ et par la loi de recombinaison des ions de signes contraires.

Ce *retard* à la décharge, prévu par la théorie des ions, fut observé par M. Warburg, mais malgré sa durée assez considérable ([1]), qui peut atteindre plusieurs minutes, ses lois ne sont pas encore étudiées. L'existence du courant pendant ce retard n'a été constatée par personne, mais M. Warburg a observé que, si le gaz entre les électrodes est préalablement ionisé, la durée du retard en est diminuée et même peut être réduite à zéro.

Ces expériences ne sont pas concluantes parce que toutes les causes d'erreurs n'étaient pas éliminées.

27. M. E. Bouty, dans ses recherches sur la constante de la cohésion diélectrique des gaz, a constaté, au contraire, que « le passage de l'électricité à travers le gaz est un phénomène instantané » ([2]). M. E. Bouty a constaté en outre que, si toutes les précautions ne sont pas prises, la lueur d'effluve peut se produire en retard très appréciable par rapport à l'étincelle de charge. Pour éviter toute perturbation que peut apporter une charge adhérente aux parois du ballon, M. Bouty était obligé de le laisser en repos prolongé après chaque mesure. L'expérience a montré que ce délai devait aller jusqu'à 24 heures. Pour l'abréger on arrosait le ballon pendant 10 minutes avec de la paraffine fondue et maintenue à 150°. C'est seulement avec des précautions aussi minutieuses qu'on pouvait obtenir des mesures régulières et concordantes. Dans ces conditions M. Bouty n'a jamais constaté de

---

([1]) J.-J. Thomson, *loc. cit.*

([2]) Bouty, *Bulletin de la Soc. de Ph.*, Paris, 1903, p. 104.

retard à la décharge appréciable à l'observation directe. Mais, lorsque les mesures étaient exécutées à des intervalles de temps assez rapprochés sans que le ballon soit chauffé entre deux expériences consécutives, un écart sensible avait lieu entre les mesures exécutées dans des conditions identiques; on observait en même temps un retard à la décharge qui pouvait durer pendant plusieurs minutes.

Il en résulte qu'un retard prolongé doit être attribué à des causes fortuites et que, si un retard existe en réalité, sa durée doit être inappréciable à l'observation directe.

Les expériences de M. Bouty furent exécutées dans des conditions spéciales : en effet, dans ces expériences, le ballon contenant le gaz était sans électrodes et la décharge se manifestait par une lueur, de sorte qu'on pourrait objecter que les résultats ne seraient pas les mêmes si une étincelle éclatait entre deux électrodes métalliques.

Cette objection nous semble sans fondement, parce que le retard à la décharge étant prévu par la théorie des ions comme un phénomène général, devrait précéder toute décharge électrique dans les gaz quelles que soient les conditions de sa production. Les expériences de M. E. Bouty présentent en outre cette garantie que le ballon est placé entre deux plateaux du condensateur qui se trouve dans une enceinte close et que les observations s'effectuent dans l'obscurité, de sorte que le gaz étudié se trouve toujours à l'abri de tout agent d'ionisation.

28. Il résulte donc des expériences de M. Bouty que si la décharge électrique dans les gaz se compose de deux phénomènes, le premier obscur et le second lumineux, le premier, appelé *retard* à la décharge, doit avoir une durée inappréciable à l'observation directe. Qnant au second phénomène, il est, d'après M. Bouty, instantané.

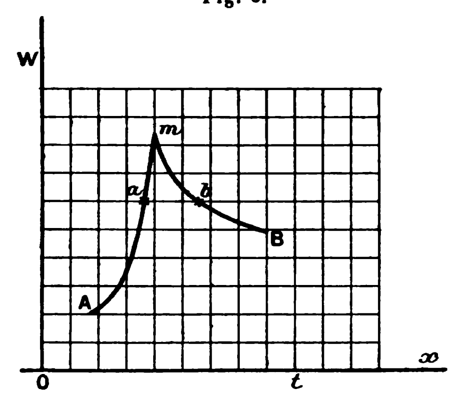
Examinons quelles sont les phases de l'étincelle qui correspondent à ces deux phénomènes.

D'après les photographies obtenues par MM. Schuster et Hemsalech sur des pellicules mobiles, l'étincelle est constituée par un trait lumineux et une auréole. Cette dernière est formée par la vapeur métallique lumineuse dont les particules se meuvent avec une vitesse finie. Cette phase de l'étincelle n'a pas d'analogue dans les effluves qui se produisent dans les conditions expérimentales des recherches de M. E. Bouty.

Le trait lumineux de l'étincelle offre un spectre de lignes de l'air et sa durée est si courte que, sur une pellicule qui se déplace avec une vitesse linéaire de 100^{m} à la seconde, son image ne subit aucune déformation. C'est donc le phénomène analogue à l'effluve instantanée de M. Bouty.

Si ce trait lumineux est constitué par des ions mobiles, leur vitesse doit être de beaucoup supérieure à celle des particules de l'auréole. Le trait lumineux correspond donc au maximum de l'énergie cinétique des ions, dont les va-

Fig. 6.



riations peuvent être représentées par une courbe de la forme suivante (*fig.* 6) :

Le temps est porté sur l'axe des x, l'énergie cinétique sur l'axe des y. Le point m correspond au maximum de

l'énergie cinétique des ions, c'est-à-dire à l'instant du trait lumineux. A partir de ce moment la vitesse des ions diminue, la courbe décrit le tracé *mb*, pendant cet intervalle du temps les particules sont lumineuses et fournissent le spectre du métal des électrodes. Leur vitesse décroît, ce qui est démontré par la forme des traits sur la photographie de MM. Schuster et Hemsalech (*fig.* 3, n° 8), de sorte que la courbe *mb* doit se rapprocher de l'axe des x.

Si le trait lumineux est précédé d'un régime variable, où le nombre d'ions ainsi que leur vitesse vont en croissant, ce régime, appelé *retard,* peut être représenté par la branche A*m* de la courbe A*m*B. L'état physique des particules matérielles le long du chemin A*m* est le même pour tous les points; en effet, la décharge électrique, d'après la théorie des ions, ne s'effectue que par l'intermédiaire des ions en mouvement dont la vitesse et le nombre sont seuls variables. Donc les ions au point A et au point *m* ne se distinguent entre eux que par leur vitesse de translation.

Mais au moment *m* de la décharge, les particules de l'air sont lumineuses, tandis que, au point A, elles sont invisibles. Donc l'accroissement de la vitesse de translation et, partant, de la force de collision entre les ions a pour effet un dégagement de lumière.

Quel est le moment où commence cette émission des ondes lumineuses et quelle est la valeur de l'énergie cinétique nécessaire à la production de ce phénomène?

Nous ne possédons aucuné donnée expérimentale pouvant résoudre ces questions. Mais nous savons que la courbe *m*B correspond à l'auréole qui est lumineuse. Donc l'énergie cinétique des ions qui la constituent est suffisante pour la production du phénomène lumineux, et, par conséquent, tous les points de la courbe A*m* dont les ordonnées sont égales aux ordonnées de la courbe

*m*B, doivent correspondre à une phase lumineuse de la décharge. Il s'ensuit que le trait lumineux de l'étincelle devrait être précédé d'une phase également lumineuse et pendant laquelle la vitesse des ions croît d'une façon accélérée.

L'image photographique de cette phase sur une pellicule mobile devrait se placer en avant du trait lumineux dans une position symétrique à l'image de l'auréole.

Or les photographies de Feddersen, ainsi que celles de MM. Schuster et Hemsalech, prouvent que le trait lumineux n'est précédé d'aucune émission de lumière. Sur toutes ces photographies, le mouvement initial de la décharge est représenté par une ligne droite, brusque et nette, suivie d'une série de traits de plus en plus inclinés de l'auréole.

On est donc en droit de conclure qu'aucun fait expérimental ne vient à l'appui de l'hypothèse que le *retard* est la phase initiale de la décharge électrique, précédant le trait lumineux de l'étincelle.

Au contraire, toutes les observations précises effectuées par divers expérimentateurs tendent à démontrer que la rupture de la *cohésion diélectrique* des gaz est un phénomène brusque et instantané qui se traduit soit par l'effluve, soit par le trait lumineux de l'étincelle.

C'est pour étudier le mécanisme de cette rupture que j'ai exécuté les expériences dont la description va suivre.

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE.

29. Toute rupture est suivie d'un mouvement. Par conséquent, étudier le mécanisme d'une rupture, c'est étudier les caractères des mouvements qui l'accompagnent. L'étude de l'étincelle se réduit donc à la détermination des caractères des différents mouvements qu'on observe sur son chemin et autour d'elle. Il faut pour cela

établir la distinction entre les mouvements parasites, provenant des causes extérieures et les mouvements propres à l'étincelle.

Le principe de la méthode expérimentale consiste donc dans l'emploi d'un moyen permettant de débarrasser l'étincelle des mouvements parasites, de partager ensuite l'étincelle en ses deux parties constituantes, auréole et trait lumineux, et de les étudier chacune à part.

C'est dans ce but que j'ai employé la flamme comme moyen de canalisation de la matière en mouvement dans l'étincelle et autour d'elle. En outre, la flamme étant elle-même de la matière en mouvement, les modifications de forme qu'elle subit sous l'influence d'une décharge peuvent servir d'indication de direction des forces agissantes.

En faisant éclater l'étincelle suivant la direction du gaz de la flamme, ou bien dans le sens inverse, ou enfin perpendiculairement à son axe, je réalisai ainsi toutes les combinaisons de composition de deux sortes de mouvements, de ceux de l'étincelle avec ceux des gaz de la flamme.

30. Quatre modes d'observations furent employés : 1° observation directe de l'étincelle, coloration par la vapeur de sodium des courants de la matière entraînée par l'étincelle et mesure des variations de résistance au moyen d'un excitateur à boules placé en dérivation; 2° étude des phénomènes mécaniques qui se manifestent sur les deux pôles, observations directes et observations au moyen d'un thermomètre différentiel; 3° étude spectroscopique du trait lumineux et de l'auréole; 4° formation de dépôts de la matière projetée autour de l'étincelle dans des conditions diverses et étude de leur forme et de leurs propriétés physico-chimiques.

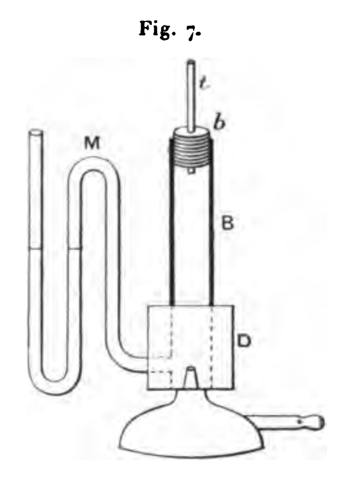
1. La façon de se comporter d'une flamme chargée d'électricité ou traversée par une étincelle.

31. *Description des appareils.* — Lorsqu'une étincelle éclate entre deux flammes de gaz d'éclairage fournies par deux bunsens ordinaires, réunis respectivement à deux pôles d'une bobine d'induction, les mouvements qui en résultent sont trop violents pour pouvoir être étudiés. En outre, la déperdition de l'électricité par ces flammes étant considérable, l'étincelle est peu nourrie et irrégulière.

Les petites flammes sont plus commodes et elles permettent de réaliser des conditions nécessaires de stabilité et de régularité de l'étincelle.

Un bec Bunsen ordinaire B (*fig.* 7), fermé par un bouchon en laiton *b*, laisse passer le gaz par une petite tubulure *t* en cuivre, de $0^{mm},5$ de diamètre intérieur Sur la partie inférieure du bec est mastiquée une douille D en

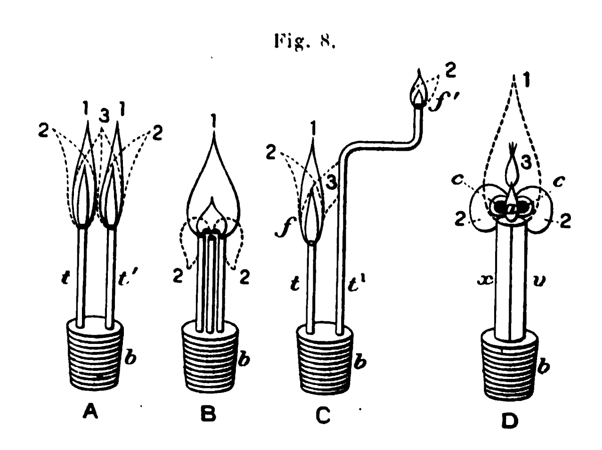
Fig. 7.



bois, qui porte un manomètre M indiquant la pression du gaz à l'intérieur du bec B. Ce dispositif permet de

répéter les expériences, toujours dans les mêmes conditions de pression et de vitesse d'écoulement du gaz. Le bouchon *b*, vissé sur le bec, peut être remplacé par d'autres portant de petits tubes de dimensions et de forme variables (*fig.* 8, A, B, C, D). Le bouchon A porte

Fig. 8.



deux tubes identiques *t* et *t'*, donnant deux petites flammes parallèles 1, 1, qui prennent des positions différentes suivant qu'elles sont chargées d'électricité (positions 2, 2) ou qu'elles sont traversées par une étincelle (position 3). Le bouchon C est une variante de A, où le tube *t'* est plus long que *t* et deux fois recourbé. Le frottement du gaz dans *t'* est plus considérable que dans *t*, de sorte que la flamme *f'* est plus petite que la flamme *f*; elle est juste suffisante pour fixer l'étincelle à l'extrémité du tube *t'*. Avec le dispositif A (*fig.* 8), on peut étudier le rapport mutuel entre deux flammes identiques non chargées, chargées d'électricité de même signe ou traversées par une étincelle. Dans le cas C on observe les mêmes rapports entre une flamme et un conducteur. Le dispositif B réalise une flamme large, où la combustion n'est pas complète, le débit du gaz étant plus fort que dans les dispositifs

précédents. C'est un bouchon *b* traversé par un faisceau de 7 tubes de mêmes dimensions, soudés entre eux sur toute leur longueur.

Dans tous ces cas l'étincelle passe par la partie extérieure de la flamme pour aboutir à un point de l'orifice d'un des petits tubes. On fixe l'étincelle en coupant le tube en biseau de façon que le plan de l'orifice soit un peu incliné sur l'axe du bec de gaz. Dans ces conditions,

Fig. 9.

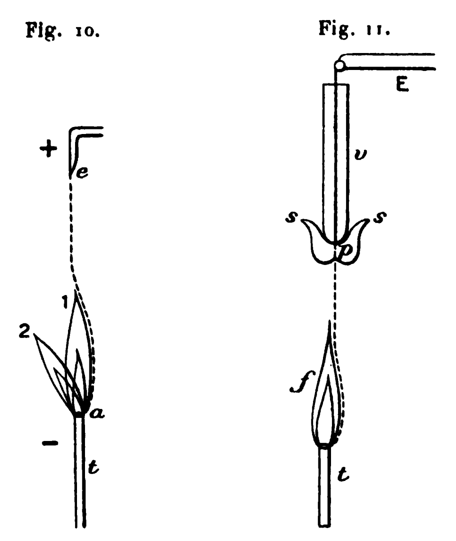


si *t* (*fig.* 9) est la partie supérieure d'un tube, l'étincelle part toujours du point *e*.

Pour faire passer l'étincelle dans l'intérieur de la flamme, je fais arriver le gaz par un tube en verre V (*fig.* 8, D), dans l'axe duquel passe une tige métallique *x*, soudée au bas du bouchon *b*; la tige *x* dépasse légèrement le tube V et porte à son extrémité supérieure des bouts métalliques interchangeables *a*, dont la forme variable imprime à la flamme des aspects divers.

32. *Électrodes métalliques.* — L'étincelle éclate entre la flamme produite dans des conditions décrites ci-dessus et une électrode métallique placée au-dessus de la flamme (*fig.* 10) ou à côté d'elle. Cette électrode est portée par une pince articulée, glissant le long d'une tige verticale, fixée sur un pied lourd. J'ai employé en guise d'électrode une tige en laiton, terminée en pointe, ou une boule, ou bien une aiguille à coudre. Dans le cas particulier où j'avais besoin de colorer le courant de matière transportée le long de l'étincelle, j'employais l'électrode en verre de

la figure 10. C'est un tube en verre V suspendu verticalement sur une tige métallique en communication avec un pôle de la bobine d'induction. Dans ce tube, suivant



son axe, est soudé un fil de platine *p*, dont l'extrémité inférieure dépasse d'une faible fraction de millimètre l'extrémité du tube V. Lorsque l'étincelle éclate entre cette électrode et la flamme qui se trouve au-dessous d'elle, le verre, porté à une haute température, se décompose en fournissant de la vapeur de sodium qui colore l'étincelle en jaune.

Mais l'électrode la plus commode pour ce genre d'expériences est une forte tige en laiton terminée en pointe. On peut l'introduire dans l'intérieur de la flamme sans aucun danger pour elle.

33. *Expériences.* — La flamme fournie par le bec décrit ci-dessus (*fig.* 7) est facilement réglable. Sa hauteur peut varier de 2^{mm} jusqu'à 5^{cm} environ. Pour charger cette flamme, le bec de gaz, posé sur une lame de verre ou d'ébonite, est relié à un des pôles de la bobine d'in-

duction. Dès qu'on lance le courant dans le primaire de cette dernière, la flamme se raccourcit légèrement et devient plus lumineuse, sans changer de forme. Chaque interruption du courant primaire se traduit par une variation de la longueur de la flamme, de sorte que, dans un miroir tournant, son sommet décrit une ligne en zigzag. Ces oscillations sont encore plus marquées lorsque le secondaire de la bobine se décharge dans un excitateur à boules, dont un pôle est en communication métallique avec le bec de gaz en question. Chaque étincelle de l'excitateur produit une oscillation brusque de la flamme.

Lorsqu'on a deux becs, reliés respectivement à deux pôles d'une bobine de Rhumkorff et placés à une distance assez grande l'un de l'autre pour que l'étincelle ne puisse pas éclater entre eux, mais assez rapprochés pour que la force d'attraction électrostatique puisse se manifester, les deux flammes s'attirent comme deux conducteurs flexibles. On aperçoit dans l'obscurité, au sommet de chacune d'elles, des aigrettes qui ne se distinguent en rien des aigrettes ordinaires. L'aigrette de la flamme positive a l'aspect d'un panache dont le pied sort du sommet de la flamme, tandis que l'aigrette négative, dépourvue de pied, entoure toute la partie supérieure de la flamme correspondante.

Si l'on a deux flammes identiques (1, 1, *fig.* 8, A) et parallèles, fournies par un même brûleur, la charge électrique, positive ou négative, produit une répulsion entre elles ; les flammes prennent les positions 2, 2 ; mais lorsqu'on approche au-dessus d'elles une électrode en communication avec le pôle opposé de la bobine, une étincelle éclate entre cette électrode et l'un des tubes t ou t' en passant entre les deux flammes, qui quittent les positions 2 et 2 pour prendre une nouvelle position 3. Les flammes sont attirées comme deux conducteurs parallèles parcourus par un courant.

Le même phénomène s'observe avec le dispositif *c* (*fig* 8). Le bec de gaz étant chargé, la flamme *f* est repoussée par le tube *t'* dans la position 2, mais vient-on à faire passer une étincelle entre une électrode quelconque et la flamme *f'*, la flamme *f* prend immédiatement la position 3. Dans ce cas, le tube *t'* remplace une des flammes de la figure 8, *A*, sans que l'aspect du phénomène change. On peut donc assimiler la flamme à un conducteur solide et flexible.

En effet, les conducteurs sont caractérisés par le fait que toute leur charge statique se porte sur la surface. Au contraire, un gaz rendu conducteur par un moyen quelconque est considéré comme un ensemble de particules qui peuvent posséder des charges indépendantes l'une de l'autre, et, si les charges électriques de toutes les particules comprises dans un volume déterminé étaient d'un même signe, le gaz aurait manifesté une tendance à se disperser. La flamme est constituée par un ensemble de gaz et de particules solides incandescentes. Si la charge électrique se distribuait parmi toutes les particules solides et les molécules gazeuses de la flamme, elles se disperseraient. Mais l'expérience prouve que la flamme ne se comporte pas de cette façon : tandis que deux flammes voisines et électrisées d'une même électricité se repoussent, on n'observe, à l'intérieur de la flamme, aucune répulsion entre les particules, puisque la forme de la flamme n'est pas altérée.

Les aigrettes, qui se manifestent au sommet de la flamme, prouvent que l'électricité se distribue sur sa surface de la même façon que sur la surface d'un conducteur terminé en pointe.

Il y a donc une analogie complète entre une flamme et un conducteur solide.

34. Toutes les régions de la flamme ne possèdent pas la même conductibilité électrique. En effet, lorsqu'on fait

passer la décharge entre une électrode métallique et une flamme, l'étincelle longe toujours sa gaine extérieure. Cette gaine gazeuse, presque invisible, enveloppe toute la flamme et ne contient pas de particules incandescentes en suspension. L'étincelle, quelle que soit sa direction, passe toujours par cette gaine et ne pénètre jamais dans l'intérieur de la flamme. Celle-ci, nullement déformée (*fig.* 10), s'incline légèrement, en vertu de l'attraction exercée sur elle par l'étincelle.

Pour faire passer l'étincelle dans l'intérieur de la flamme, j'ai employé le bec de gaz représenté sur la figure 8, D. La flamme, avant la décharge, a l'aspect bien régulier, tracé par le pointillé 1. L'étincelle pénètre forcément dans l'intérieur parce qu'elle ne peut éclater qu'entre la pointe *a* du brûleur en question et l'électrode opposée. Contrairement au cas précédent, l'aspect de la flamme en est complètement modifié. Elle s'écrase, donnant lieu à une figure de révolution 2,2 et mettant à nu le sommet de la pointe *a*. On aperçoit sur cette pointe une petite flamme 3, très brillante, par la gaine extérieure de laquelle passe l'étincelle. Ce phénomène se manifeste toujours de la même façon, quel que soit le sens du courant de la décharge. La petite flamme 3 est très brillante tandis que la flamme 2 est au contraire fumante et dépose du charbon en abondance dans l'espace annulaire *cc* et sur la partie supérieure du tube en verre *v*.

Ce phénomène rappelle l'expérience classique de la dispersion de la fleur de soufre par l'étincelle, qui éclate au centre d'un petit tas de cette poudre. De même que la fleur de soufre de cette expérience, les particules du charbon en suspension dans la flamme sont dispersées par l'étincelle qui pénètre à l'intérieur de la flamme. Quant à la petite flamme 3, elle n'est pas écrasée parce que l'étincelle peut atteindre la pointe *a* en passant par sa gaine extérieure.

Il résulte de ces expériences que la flamme, au point de vue électrique, est constituée par une enveloppe gazeuse conductrice à l'intérieur de laquelle, comme dans un cylindre de Faraday, se trouve une agglomération de particules solides.

Lorsqu'on charge la flamme, l'électricité se distribue sur sa surface sans pénétrer plus profondément.

35. Les expériences préliminaires décrites ci-dessus étaient nécessaires pour éclaircir la manière de se comporter de la flamme lors d'une décharge électrique.

Outre les propriétés mentionnées au paragraphe précédent, la flamme en possède encore une, à savoir : En chauffant l'air qui l'entoure, elle provoque un courant ascendant de gaz chaud qui emporte une certaine partie de la charge électrique, de sorte que l'étincelle passe plus facilement lorsque la flamme est au pôle négatif que dans le cas contraire. La différence est assez sensible. C'est ainsi qu'un excitateur à boules placé en dérivation dans le secondaire de la bobine d'induction indique une résistance presque deux fois plus grande lorsque l'étincelle passe de la flamme à la pointe que dans le sens inverse.

En effet, la distance entre l'orifice du tube *t* (*fig.* 7) et la pointe de l'électrode placée au-dessus de la flamme mesurant 8^{cm}, et la hauteur de la flamme étant de 4^{cm}, l'étincelle équivalente dans l'excitateur à boules est de 3^{mm}, lorsque la flamme est au pôle négatif; elle est de 5^{mm} dans le cas de la flamme positive. Dans les deux cas la flamme se comporte d'une façon différente. Lorsqu'elle est au pôle positif, l'étincelle passe par la gaine extérieure en lui communiquant une luminescence particulière de couleur rose violacée qui se prolonge jusqu'à l'extrémité du pôle opposé. La flamme s'incline légèrement, accusant une attraction entre elle et l'étincelle en même temps que son éclat s'accroît d'une façon notable.

Lorsque la flamme est au pôle négatif, elle se dédouble comme on le voit sur la figure 10; l'étincelle aboutit à un point a de l'orifice du bec de gaz en passant par la gaine extérieure de l'une des deux flammes. Cette flamme 1 est attirée par l'étincelle tandis que la flamme 2, ayant la base commune avec la flamme 1, s'en écarte sous un certain angle qui dépend de l'incidence de l'étincelle. Si celle-ci est fixe, la flamme l'est aussi; mais, si son point terminal a se déplace sur le périmètre de l'orifice du bec de gaz, la flamme 2 tourne aussi autour de l'axe du tube t. De cette façon l'étincelle, l'axe du tube et l'axe de la flamme 2 restent toujours dans un même plan vertical. Ce phénomène ne se produit pas avec les flammes larges. Les meilleures conditions sont les suivantes : le diamètre intérieur du tube t ne doit pas dépasser $0^{mm},5$, ses parois doivent être très minces et l'orifice incliné sur l'axe.

J'attribue ce phénomène à l'action mécanique de l'étincelle, dans laquelle s'effectue un transport de matière du pôle positif vers le pôle négatif. Ce transport est mis en évidence par l'expérience suivante [1] :

Au-dessus de la flamme est suspendu verticalement un tube en verre v (*fig.* 11) dans lequel est soudé un fil de platine. Lorsque la flamme est au pôle négatif, la vapeur de sodium dégagée par le verre est transportée tout le long de l'étincelle, de sorte que la flamme entière se trouve colorée en jaune; mais vient-on à intervertir le sens du courant, et la coloration de la flamme disparaît immédiatement. La vapeur de sodium entoure l'électrode v en forme d'une flamme s, tandis que la flamme du gaz f reste absolument incolore. Cette expérience, facile à réaliser, est très démonstrative. Elle peut servir d'expérience de cours pour démontrer que, lors d'une décharge disruptive, le transport de la matière par l'étincelle ne s'effectue que dans

[1] *Comptes rendus*, mai 1902.

un seul sens : du pôle positif vers le pôle négatif. Il suffit pour cela de tourner le commutateur du primaire dans un sens ou dans l'autre, et la flamme se colorera en jaune ou restera incolore.

2. Actions mécaniques et calorifiques de l'étincelle.

36. La matière est transportée, comme nous venons de le voir, du pôle positif vers le pôle négatif. Ce flux anodique arrive sur la cathode avec une grande vitesse et y produit des effets mécaniques et calorifiques divers. Pour étudier ces faits, j'ai employé des électrodes solides et liquides, ainsi qu'un excitateur muni d'un thermomètre différentiel.

La flamme fournie par le dispositif de la figure 7 servait comme une des électrodes. Si l'on emploie une aiguille en acier comme électrode opposée, celle-ci étant au pôle négatif brûle comme dans l'oxygène pur en projetant des étincelles autour d'elle. Ce phénomène ne se produit plus lorsque le sens du courant est interverti.

On peut rapprocher ce phénomène du fait observé par M. Bichat (*voir* n° 11). Ce physicien a constaté que les pointes en métaux oxydables s'oxydent plus facilement lorsqu'elles possèdent une charge négative et que cette réaction chimique est accompagnée d'un abaissement du *potentiel du départ*.

En effet, le fil métallique de son *tourniquet électrique* étant en fer ou en autre métal oxydable chargé positivement, le potentiel du départ est le même que pour le platine ou pour l'or, c'est-à-dire de 69 unités C. G. S.; mais il est de 63 unités lorsque le fil chargé négativement est en platine, et seulement de 56 unités le fil étant en fer non oxydé. Ce potentiel monte pendant l'expérience pour atteindre au bout de quelques minutes la valeur de 63 unités, et en même temps le fil de fer s'oxyde. Lorsque

l'oxydation superficielle est achevée, le potentiel reste constant et égal au potentiel des fils non oxydables.

Il nous semble que ce phénomène peut s'expliquer de la façon suivante : les molécules gazeuses, se trouvant dans le champ, se transportent suivant les lignes des forces électriques. Lorsque le fil métallique est chargé négativement, les molécules arrivent sur lui possédant une certaine énergie cinétique que nous appellerons E. En se réfléchissant sur la surface du fil, les molécules cèdent une partie de cette énergie au tourniquet en emportant une autre partie avec elles. Soit T l'énergie cédée au tourniquet, M l'énergie des molécules réfléchies,

$$E = M + T.$$

Le tourniquet se mettra à tourner lorsque l'énergie T sera suffisamment grande pour vaincre son inertie.

Dans le cas où les molécules, au lieu de se réfléchir, se fixent sur le fil du tourniquet, $M = 0$, toute l'énergie cinétique des molécules est cédée à l'appareil. On a

$$E' = T$$

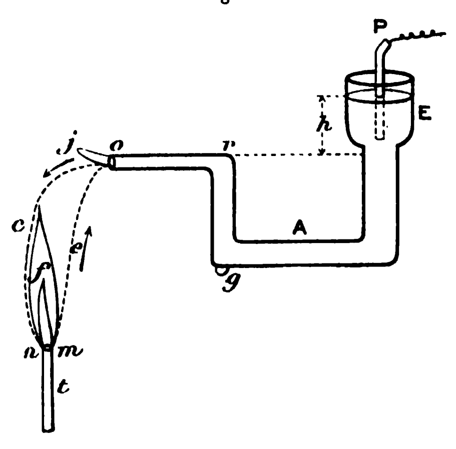
et par conséquent $E' < E$, c'est-à-dire que dans le cas du fil oxydable l'énergie cinétique des molécules gazeuses provoquant la rotation du tourniquet est plus faible que dans le cas du fil non oxydable; et comme cette énergie cinétique est produite par le champ électrique, il s'ensuit que le potentiel du départ dans le premier cas doit être plus faible que dans le second cas. C'est ce qui est vérifié par l'expérience.

Le flux anodique se réfléchit donc sur la cathode en y produisant des phénomènes chimiques et mécaniques.

37. La réflexion du flux anodique sur la cathode et son action mécanique s'observent facilement sur les électrodes liquides ainsi que sur la flamme du gaz d'éclairage. Je me suis servi à cet effet d'un entonnoir en verre E (*fig.* 12) dont la gorge A est repliée trois fois sous l'angle droit,

et rempli d'une solution aqueuse d'un sel quelconque. Le niveau du liquide dans l'entonnoir E se trouve au-dessus de la branche horizontale *or*, de sorte que la pres-

Fig. 12.



sion à l'orifice *o* du tube est de $1^{cm},5$ environ. Une lame de platine *p* plongée dans le liquide est en communication avec un des pôles d'une bobine d'induction. Le pôle opposé de la bobine est relié au bec de gaz *t*.

Lorsque la flamme est au pôle négatif, l'étincelle suit le chemin *ocn*, la flamme se dédouble comme cela a été décrit au n° 35; en même temps, au pôle positif, l'eau s'évapore très vite et un champignon de sel décomposé pousse sur l'orifice *o*; ce champignon atteint en quelques secondes plusieurs millimètres de longueur et tombe sous son poids en laissant la place à un nouveau champignon; des vapeurs métalliques se produisent et la flamme se colore faiblement, suivant le sel employé. Mais, si le liquide, sous une certaine pression, s'écoule goutte à goutte, l'étincelle jaillit entre la flamme et chaque goutte en voie de formation. Dans ce cas, ni l'étincelle, ni la flamme ne se colorent jamais.

Lorsque la flamme est au pôle positif, l'étincelle suit

le chemin *meo*; le flux anodique arrive avec une grande vitesse sur la surface du liquide, et du point de son incidence jaillit un jet lumineux. Ce jet, qui peut atteindre plusieurs millimètres de longueur, est doué d'un éclat considérable. Sa couleur est celle d'une étincelle qui éclaterait entre deux électrodes faites en métal dont le sel se trouve en solution dans le tube *or*. La couche capillaire du liquide est brisée par le flux anodique, et le liquide, se trouvant sous la pression *h*, s'écoule petit à petit le long de la paroi extérieure du tube en verre *vq*. En même temps il se forme autour de la cathode une nuée de gouttelettes microscopiques voltigeant autour de l'étincelle comme la poussière dans un faisceau de rayons lumineux. On se trouve en présence de quelque chose d'analogue au nuage qui se forme au bas d'une chute d'eau. Une lame de verre, introduite dans cette région, se recouvre d'une buée qui, examinée au microscope, se présente comme une multitude de gouttelettes toutes du même ordre de grandeur (quelques centièmes de millimètre). Le liquide s'évapore très vite, abandonnant sur le verre des cristaux parfaitement bien formés. Quand le liquide faisant office de cathode est une solution de chlorure de sodium, on aperçoit, au microscope, sur la lame de verre, des cubes transparents assemblés en anneaux et dessinant ainsi les contours des gouttelettes évaporées; à l'intérieur de ces anneaux se trouvent clairsemés d'autres cubes de plus grandes dimensions, souvent munis de trémies. Il s'ensuit que le liquide, projeté sous forme de poussière en dehors du tube, n'est pas altéré. La cause du phénomène en question est donc purement mécanique: c'est la *chute* sur la surface du liquide des particules constituant le flux anodique.

Quant au jet lumineux qui sort de la cathode liquide, il est formé par l'eau et le sel réduits en vapeur au point d'aboutissement de l'étincelle.

En effet, lorsqu'une étincelle éclate entre deux électrodes métalliques, on voit sur chacune d'elles un point lumineux, tandis que l'électrode entière reste obscure. De même, on observe ce point lumineux sur la surface du liquide : c'est le point où aboutit l'étincelle.

Examiné de près à la loupe, il présente certaines particularités caractéristiques : c'est une tache fluorescente de $0^{mm},5$ de diamètre environ, qui possède une épaisseur. Elle a la forme d'une calotte sphérique dont la surface convexe plonge dans le liquide. N'ayant pas de position fixe, elle exécute des mouvements très vifs sur la surface liquide de la cathode. Le liquide, dans la région de cette tache fluorescente, se trouve dans un état surchauffé. On aperçoit, à la loupe, une grande quantité de petites bulles gazeuses se déplaçant rapidement au pied de l'étincelle et donnant naissance au jet lumineux qui sort de la cathode. Cette ébullition violente est strictement localisée à la tache fluorescente. La température du liquide autour d'elle est au-dessous de $100°$, ce dont on peut se convaincre en examinant les gouttelettes microscopiques projetées autour de la cathode, comme nous venons de le faire ci-dessus.

La chute du flux anodique sur la surface d'une cathode liquide produit donc les phénomènes suivants : Autour du point extrême de l'étincelle le liquide, avec le sel en dissolution, est réduit en vapeur fluorescente qui jaillit de la cathode en forme de jet lumineux. Examiné au spectroscope, le jet lumineux présente les raies de l'hydrogène, ainsi que les raies du métal dont le sel se trouve en solution dans le liquide de la cathode. Autour de celle-ci on observe la formation d'une nuée de gouttelettes microscopiques de la solution saline qui n'est pas altérée.

38. La direction du jet lumineux dépend de la direction de l'étincelle et de la position de la cathode. C'est

ainsi que l'étincelle étant perpendiculaire à la cathode, le jet lumineux l'entoure en forme de manchon; mais lorsque l'angle d'incidence du flux anodique varie de 0° à 90°, le jet s'en détache sous forme d'une petite flamme *j* (*fig.* 12).

C'est en raison de cette variation de l'angle du jet en fonction de l'incidence du flux anodique que j'ai donné au phénomène le nom de *reflux cathodique* (1). On peut le définir comme un *entraînement de matière par le flux anodique après sa réflexion sur la cathode.*

39. Le même phénomène se produit sur la cathode gazeuse. Nous avons décrit ci-dessus le dédoublement de la flamme qui ne se produit que si le bec de gaz est au pôle négatif. Mais comme dans ce cas l'étincelle arrive sur la paroi du tube, il faut que celle-ci soit très mince, pour qu'une partie du flux anodique puisse tomber dans l'intérieur du tube en produisant à son orifice la déformation du courant gazeux, ce qui entraîne le dédoublement de la flamme.

40. On peut aussi observer la réflexion du flux anodique sur une cathode solide. Si l'on emploie à cet effet l'électrode en fil de platine soudé dans un tube de verre (*fig.* 11), la vapeur de sodium colore en jaune l'étincelle et la flamme, lorsque l'électrode en question sert d'anode. La direction du courant électrique étant renversée, la vapeur de sodium ne descend plus dans la flamme : elle entoure, en forme de manchon *s* (*fig.* 11), la partie supérieure de l'étincelle, et monte, entraînée par le courant ascendant d'air chaud.

Mais, lorsque la cathode V est horizontale (*fig.* 13), le jet *j* de la vapeur jaune sort de l'électrode comme le jet lumineux de la cathode liquide.

Le reflux cathodique est donc un phénomène général,

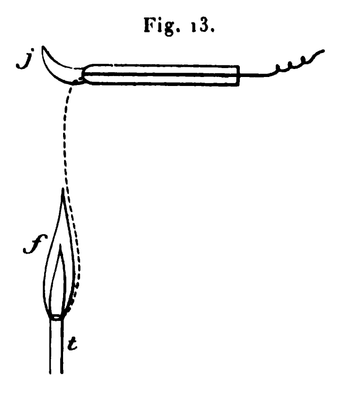
---

(1) *Comptes rendus*, t. CXXXIV, 1902, p. 1200.

quel que soit l'état de l'électrode négative : solide, liquide ou gazeux.

41. Le transport de la matière le long de l'étincelle

Fig. 13.



s'effectue dans un seul sens, du pôle positif vers le pôle négatif, et ce transport constitue le flux anodique.

Quant au transport dans le sens inverse, il ne s'observe que dans les cas spéciaux. Par exemple, lorsque les pôles sont très rapprochés, le jet de la vapeur cathodique peut atteindre le pôle positif. Lecocq de Boisbaudran (1) a observé ce phénomène dans les étincelles à la cathode liquide.

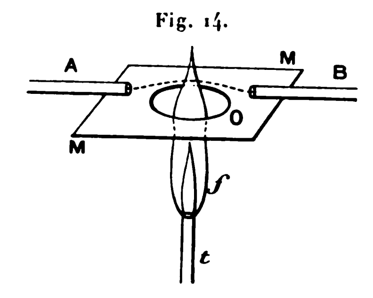
J'ai pu obtenir un transport de ce genre à des distances relativement considérables. J'employai à cet effet deux électrodes liquides entre lesquelles jaillissait une étincelle horizontale.

Deux tubes de verre A et B (*fig.* 14), remplis d'une solution de chlorure de cuivre, sont disposés horizontalement. Au-dessous de ces tubes, à une distance de quelques millimètres, dans un plan horizontal, est placée une lame de mica M, dont la forme et les dimensions sont indi-

(1) Lecocq de Boisbaudran, *Spectres lumineux*. Paris, Gauthier-Villars, 1874.

quées sur la figure 15. Les extrémités des tubes se trouvent juste au-dessus des points extrêmes du grand diamètre de

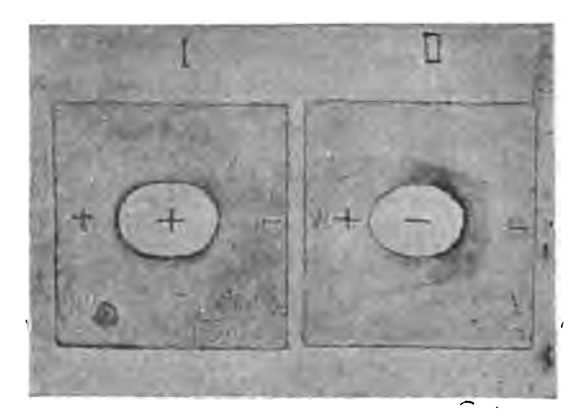
Fig. 14.



l'ouverture O, destinée au passage d'une petite flamme. La flamme, chauffant l'air, le rend meilleur conducteur, ce qui permet d'écarter les pôles et d'obtenir une étincelle assez longue.

Lorsqu'on fait passer la décharge, une nuée de petites

Fig. 15.



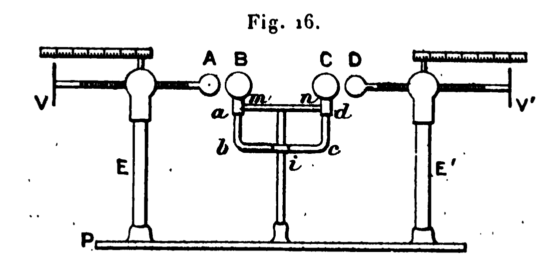
gouttelettes se forme autour de la cathode, se dirige vers le pôle positif, en contournant la flamme et dépose des cristaux sur la lame de mica, où elle trace ainsi l'empreinte de son trajet (*fig.* 15, II). Mais ce trajet, ayant une forme

bien régulière, ne s'observe qu'à l'abri de toute perturbation. Ainsi, lorsqu'on met le bec de gaz en communication avec le pôle positif de la bobine, les fluctuations de la flamme à chaque décharge suffisent pour altérer sa forme (*fig.* 15, 1).

Il faut donc considérer ce transport comme accidentel et ne jouant aucun rôle dans la décharge même. D'ailleurs, les photographies des étincelles oscillantes obtenues par MM. Schuster et Hemsalech prouvent qu'à chaque oscillation correspond un flux de matière incandescente partant d'une seule électrode. D'après les expériences décrites, on peut conclure que c'est l'électrode positive qui est la source de cette émission.

42. L'action mécanique du flux anodique se traduit aussi par une élévation de la température de la cathode; en effet, lorsque les deux électrodes sont métalliques, c'est la cathode qui s'échauffe le plus. On peut mettre en évidence cette différence d'échauffement des deux électrodes au moyen d'un thermomètre différentiel placé entre les

Fig. 16.



boules d'un excitateur, comme c'est indiqué sur la figure 16.

Entre les boules A et D d'un excitateur micrométrique EE se trouve un thermomètre différentiel BC, dont les boules creuses B et C, en laiton, sont mastiquées sur un tube de verre *abcd*.

Le déplacement de l'index *i* indique une différence

des températures des boules B et C, qui sont reliées entre elles par une barre métallique *mn*. Le tout est porté par une tige en verre fixée sur la planche P de l'excitateur. On règle l'appareil en établissant un contact entre A et B et entre C et D. Ensuite on écarte les boules A et D, de façon à ce que les distances AB et CD soient rigoureusement égales et l'on fait passer la décharge. Soient A-anode et D-cathode, on aura le schéma suivant :

$$\overset{+}{A}\ \overset{-}{B}\ \overset{+}{C}\ \overset{-}{D},$$

et l'index *i* se déplacera dans la direction *b* — *c*; lorsqu'on fait passer la décharge dans le sens inverse, l'indice se déplace dans la direction *c* — *b*. Plus les distances explosives AB et CD sont grandes et plus le déplacement de l'indice est fort, ce qui prouve que l'énergie cinétique du flux anodique croît avec la différence de potentiel.

Lorsqu'on intercale dans le secondaire de la bobine une self-induction convenable, les boules B et C sont alternativement positive et négative, et l'index reste en repos.

43. L'échauffement du pôle positif est dû à la grande résistance électrique de la couche du passage *métal-air*, l'échauffement du pôle négatif à la résistance de la couche du passage *air-métal* et, en plus, à l'énergie cinétique du flux anodique. De sorte que, en combinant convenablement ces trois causes d'échauffement des pôles, on peut obtenir que, en apparence, une plus grande quantité de chaleur se dégagera à l'anode qu'à la cathode.

Soient, par exemple, A et B (*fig.* 14) deux électrodes liquides : A-anode et B-cathode. Lorsque la décharge passe pendant un certain temps (30 secondes à 1 minute), un champignon de sel décomposé pousse sur l'orifice de l'anode, et tout le liquide s'échauffe au point de commencer à bouillir, tandis qu'à la cathode le liquide est seulement tiède. Mais cela tient à ce que, sous l'influence du flux anodique, le liquide est projeté par la surface de

la cathode et est remplacé par le liquide moins chaud. Pour pouvoir comparer, il faut que le liquide de l'anode soit renouvelé de la même façon que celui de la cathode. Ceci s'obtient facilement en augmentant la pression dans le tube A. Dans ces conditions, le champignon ne se produit plus à l'anode et l'on peut prolonger l'expérience aussi longtemps que l'on veut sans crainte d'une ébullition à l'un des pôles.

Cette expérience permet de faire encore une constatation, à savoir que, l'anode étant constamment refroidie, l'étincelle ne transporte plus de vapeurs métalliques du pôle positif. En effet, si les solutions salines dans les tubes A et B sont différentes, par exemple du sulfate de cuivre au pôle positif et du chlorure de sodium au pôle négatif, il se forme sur le mica M un dépôt composé exclusivement de cristaux NaCl, lorsque le liquide de l'anode est constamment renouvelé. Mais, dès qu'on le laisse s'échauffer, on voit se déposer, parmi les cristaux du chlorure de sodium, des globules opaques d'un sel de cuivre. La matière de l'anode même n'est donc transportée que si l'échauffement du pôle positif donne lieu à la production de vapeurs métalliques. Il en résulte que le flux anodique n'est pas constitué par des particules arrachées du pôle positif et que la matière transportée provient exclusivement du gaz et de la vapeur se trouvant au voisinage de l'électrode et *aspirés* par l'étincelle.

44. Le courant électrique qui s'établit entre deux électrodes n'est pas de nature électrolytique. En effet, dans l'électrolyse, les ions négatifs et positifs se dirigent sur les pôles opposés, il y a donc un échange de matière dissociée dans les deux directions. Or nous avons vu que, dans une étincelle, le transport de la matière ne s'effectue que dans une seule direction. En outre, lorsque les solutions liquides des deux pôles contiennent des sels différents, comme dans l'expérience décrite au paragraphe

précédent, ce n'est pas seulement la base du sel qui est transportée à la cathode, mais aussi le métalloïde. C'est ainsi que, si l'on fait passer la décharge pendant un certain laps de temps, entre une solution de NaCl au pôle positif et une solution de $CuSO^4$ au pôle négatif, l'analyse révèle après l'expérience la présence du sodium et du chlore dans le liquide du pôle négatif.

Néanmoins, le courant de décharge a la propriété de dissocier les composés chimiques. M. Crookes a observé la décomposition du gaz acide chlorhydrique dans une ampoule traversée par une décharge électrique. M. J.-J. Thomson a dissocié la vapeur d'eau par une étincelle. Mais, dans les deux cas, le mélange des gaz dissociés se portait sur les deux pôles et l'on ne pouvait pas obtenir un partage de produits de dissociation comme cela se fait dans l'électrolyse liquide.

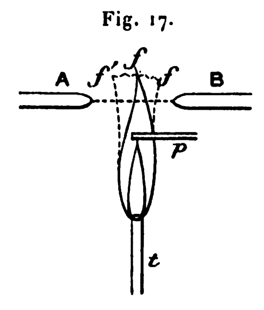
45. L'étincelle électrique a, en général, la propriété de dissocier les gaz et d'empêcher les combinaisons entre les éléments divers. C'est ainsi qu'une étincelle traversant la flamme dissocie l'hydrogène sulfuré qui se trouve mêlé au gaz d'éclairage. La vapeur du soufre qui en résulte ne brûle pas dans l'oxygène de l'air entourant la flamme, mais se dépose sur les objets voisins.

La combustion dans la flamme est empêchée par l'étincelle, ce qui entraîne la diminution de sa température. Un fil de platine p (*fig.* 17), introduit dans la flamme f, à la hauteur du sommet du cône intérieur, est chauffé au rouge blanc; mais, dès que jaillit l'étincelle entre les électrodes A et B, l'éclat du fil de platine diminue et passe du rouge blanc au rouge cerise et même au rouge sombre.

La flamme qui, avant la décharge, avait la forme régulière f, s'élargit à son sommet pendant la décharge, prenant la forme $f'f'$ et devient fumante. Une quantité de charbon s'en dégage qui se dépose sur les deux élec-

trodes A et B, ainsi que sur tous les objets se trouvant à proximité de l'appareil en question. Vient-on à intro-

Fig. 17.



duire dans cette région $f'f'$ le fil de platine, il ne tarde pas à se recouvrir d'une couche épaisse de charbon.

Toutes ces expériences prouvent que l'étincelle provoque une dissociation des molécules des gaz qu'elle traverse et qu'elle arrête les combinaisons qui sont en train de se faire. Les produits de la décomposition ne se dirigent pas nécessairement sur les deux électrodes comme dans une électrolyse liquide.

Ces points une fois établis, nous allons examiner les différentes parties de l'étincelle.

3. Étude spectroscopique de l'auréole et du trait lumineux.

46. *Méthode expérimentale.* — La méthode expérimentale consiste dans l'emploi de moyens qui permettent d'obtenir une étincelle assez longue, fixe et nourrie, dont une partie au moins serait dépourvue de l'auréole. L'étincelle doit être *horizontale;* en projetant son image au moyen d'une lentille de projection sur la fente *verticale* d'un spectroscope, on peut étudier successivement toutes ses parties d'un pôle à l'autre. On a de la sorte la possibilité de comparer les phénomènes qui se présentent dans la même étincelle, dans son trait lumineux dépourvu de l'auréole ou entouré de celle-ci.

47. *Appareils.* — Un excitateur micrométrique EE′, le même qui a servi aux expériences précédentes (n° 42, *fig.* 16), mais où le thermomètre différentiel est remplacé par un bec de gaz, peut se déplacer entre deux rails RR

Fig. 18.

(*fig.* 18) à droite et à gauche au moyen d'une vis de rappel V. L'index *c* fixé sur la planche *pp* mesure le déplacement de l'excitateur. Les boules A et B sont remplacées par des petites électrodes interchangeables ayant la forme d'obus. Le brûleur *b*, fixé à la planche de l'excitateur, porte un petit tube en laiton de 1^{mm} de diamètre intérieur. La position des électrodes par rapport à la flamme *f* est réglée au moyen des deux vis micrométriques *v* et *v′*. La petite flamme de 3^{cm} à 5^{cm} de hauteur chauffe l'air entre les électrodes et augmente de la sorte sa conductibilité. Il s'ensuit que, même avec une capacité assez forte et une bobine de self-induction intercalées dans le secondaire de la bobine d'induction, on obtient des étincelles fixes de 2^{cm} de longueur, très nourries, très brillantes et qui fournissent de beaux spectres.

L'image de l'étincelle est projetée au moyen d'une lentille L, sur la fente verticale F d'un spectroscope à vision directe dont l'axe est perpendiculaire à la direction AB de l'étincelle. Les rails RR, la lentille de projection L et le spectroscope, une fois réglés, restent immobiles durant toute la série d'expériences. Dans ces conditions, en déplaçant l'excitateur de droite à gauche ou *vice versa*,

au moyen de la vis de rappel V, on amène sur la fente du spectroscope l'image de la région voulue de l'étincelle. De cette façon on peut mesurer la distance explosive, étudier les différentes régions de l'étincelle et déterminer l'étendue de chacun des phénomènes observés.

48. Deux séries d'expériences furent exécutées avec le dispositif qui vient d'être décrit : Dans la première série d'expériences, la flamme du gaz d'éclairage restait invariable, mais les électrodes A et B furent successivement en plomb, en zinc, en cadmium et en étain; tantôt elles étaient du même métal, tantôt les métaux des deux pôles étaient différents. On avait, dans ce dernier cas, six combinaisons différentes : plomb-zinc, plomb-cadmium, plomb-étain, zinc-cadmium, zinc-étain et cadmium-étain. Ces expériences avaient pour but de rendre compte, au moyen de l'analyse spectrale, si le courant d'air ascendant produit par la flamme suffit pour entraîner la vapeur métallique et pour débarrasser de la sorte l'étincelle de l'auréole.

Dans la deuxième série d'expériences, la flamme chargée d'un sel de strontium fournissait les vapeurs de ce métal à la partie médiane de l'étincelle. Le but des expériences était d'examiner si ces vapeurs se transportaient dans le trait lumineux sur un des pôles de l'excitateur.

49. *Première série.* — L'étincelle était produite par une bobine d'induction alimentée par 10 accumulateurs. Le secondaire comprenait, en plus de l'excitateur ci-dessus mentionné, un condensateur plat et, au besoin, une bobine de self-induction.

Dans cette dernière, l'étincelle, examinée au spectroscope, présente les caractères suivants : au voisinage de chacune des électrodes on voit le spectre du métal correspondant ainsi que les raies de l'air, le milieu ne fournissant que les raies de l'air. Lorsqu'on explore l'étincelle d'une extrémité à l'autre, on voit les raies métalliques

plus fortes que celles de l'air, s'affaiblir graduellement pour disparaître complètement avant d'arriver au milieu de l'étincelle où l'on ne voit que les raies de l'air; ensuite, apparaissent très faibles les raies métalliques de la deuxième électrode, et ces raies deviennent de plus en plus fortes à mesure que l'on s'approche du pôle.

Toutes les raies métalliques ne disparaissent pas en même temps. Par exemple, si les métaux employés comme électrodes sont le cadmium et le zinc, et qu'on commence l'exploration de l'étincelle par l'extrémité contiguë à l'électrode en cadmium, les raies les plus brillantes sont le doublet vert de ce métal et trois raies bleues

$$(\lambda = 5086,06;\ 4800,15;\ 4678,45);$$

mais un faible déplacement de l'excitateur fait disparaître le doublet qui s'évanouit, presque sans transition. La région de l'étincelle, où s'observe ce doublet, ne s'étend qu'à une distance de 1^{mm} de l'électrode en cadmium.

Les trois raies bleues disparaissent graduellement, et c'est $\lambda = 5086,6$, qui s'éteint la dernière, à une distance de 7^{mm} environ de l'électrode.

En s'approchant de l'électrode en zinc, on voit apparaître presque simultanément les trois raies bleues

$$(\lambda = 4810,9;\ 4722,45;\ 4680,35),$$

dont l'intensité augmente petit à petit; ensuite viennent quelques raies très faibles et, à $0^{mm},5$ du pôle, apparaissent brusquement deux raies très brillantes et nébuleuses du doublet caractéristique du zinc

$$(\lambda = 4925,15;\ 4912,7).$$

On voit donc que l'étendue des régions d'émission des différentes radiations varie dans de larges proportions. Les doublets du cadmium et du zinc sont fournis par les rayons émanés du voisinage immédiat des électrodes; les

autres raies métalliques s'observent dans des régions plus étendues et ainsi de suite.

50. Dans les recherches spectroscopiques, où l'étincelle est ordinairement verticale et parallèle à la fente du spectroscope, les raies discontinues, qui se présentent comme deux traits verticaux l'un au-dessus de l'autre avec un intervalle entre eux, sont appelées *raies courtes*. Ces raies (comme les doublets mentionnés ci-dessus) disparaissent ou se réduisent à deux petits points, comme l'a prouvé M. Hemsalech, si l'on augmente la self-induction du secondaire de la bobine d'induction.

Dans les expériences décrites au paragraphe précédent, toutes les raies métalliques seraient *courtes,* si la fente du spectroscope était parallèle à l'étincelle, parce qu'aucune d'elles ne s'étend d'un pôle à l'autre; en revanche, toutes les raies de l'air seraient *longues,* parce qu'on les observe dans toutes les régions de l'étincelle.

Mais on peut rendre toutes les raies métalliques plus longues en rapprochant les pôles de l'excitateur. C'est ainsi que, dans une étincelle de 15^{mm} de longueur, les raies observées dans le cas précédent dans une région qui s'étend à une distance de 7^{mm} de l'électrode, sont visibles sur toute la longueur de l'étincelle; quant aux raies les les plus courtes, comme celles du doublet du zinc qu'on ne voyait précédemment que dans l'espace de $0^{mm},5$, elles deviennent visibles jusqu'à 2^{mm} de l'électrode; en même temps les électrodes s'échauffent à tel point qu'au bout de 2 minutes d'expérience elles sont fondues.

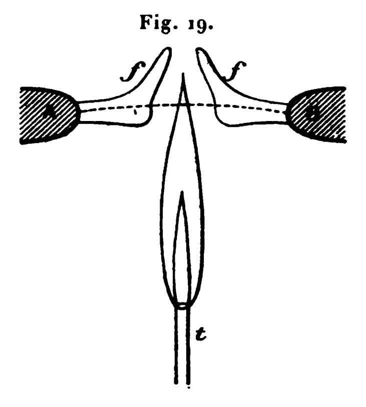
L'étincelle est donc plus chaude dans ce cas, et la vapeur métallique, échauffée davantage, émet, sur un parcours plus long, des radiations fournissant des raies *courtes*.

Une bobine de self-induction, intercalée dans le secondaire, élimine, dans le spectre de l'étincelle de 20^{mm} de longueur, toutes les raies de l'air ainsi que les doublets de zinc et de cadmium.

Aussi, n'ai-je observé au milieu de l'étincelle aucune des raies de l'air ni de celles des électrodes employées. Cette région, de 4^{mm} à 6^{mm} de longueur, suivant la nature des électrodes, ne donnait dans le spectroscope qu'un spectre continu à peine perceptible de la flamme. Au voisinage des électrodes, on ne voit que celles des raies métalliques qui, généralement, ne disparaissent pas avec la self-induction (*voir* Hemsalech, *Recherches expérimentales sur les spectres d'étincelles*). Ces raies sont très brillantes au voisinage immédiat des électrodes, mais leur éclat diminue graduellement de l'extrémité de l'étincelle vers son milieu, où les raies disparaissent complètement.

En rapprochant les pôles de l'excitateur on voit le spectre de l'étincelle s'enrichir en raies. Ce sont les raies métalliques éliminées par la self-induction qui réapparaissent les premières et, lorsque le spectre du métal est

Fig. 19.



entièrement restauré avec toutes ses raies *courtes,* apparaissent les raies de l'air, d'abord près des électrodes et ensuite au milieu de l'étincelle.

L'aspect de l'étincelle examinée à l'œil nu, est conforme aux résultats de l'analyse spectroscopique : les deux

électrodes sont réunies par un trait lumineux, rose violacé, très pâle, qui traverse la flamme (*fig.* 19). Chacune des deux extrémités de l'étincelle est entourée d'une auréole *f*, ayant l'aspect d'une petite flamme qui paraît sortir de l'électrode et qui en s'approchant de la flamme du gaz s'infléchit et prend la direction du courant d'air ascendant, de sorte que la vapeur métallique constituant les deux auréoles ne peut pas pénétrer dans la flamme du gaz. Ces auréoles, très brillantes, ont la couleur caractéristique pour le métal employé.

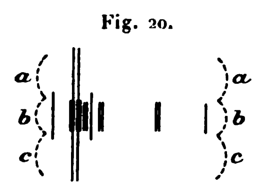
Il s'ensuit que le courant gazeux ascendant, créé par la flamme du gaz d'éclairage, enlève l'auréole du milieu de l'étincelle, pourvu que celle-ci soit suffisamment longue.

Ce fait une fois constaté, il s'agit de préciser le caractère du mouvement des particules gazeuses dans le trait lumineux de l'étincelle.

51. *Deuxième série d'expériences.* — Cette série d'expériences avait pour but de déceler dans le trait lumineux de l'étincelle le mouvement des particules suivant la ligne du courant. Le dispositif expérimental restant le même que précédemment, la flamme du gaz *f* était chargée d'un sel de strontium. En outre, afin d'augmenter la température de la flamme et l'intensité lumineuse du spectre du strontium, le gaz d'éclairage, avant son entrée dans le brûleur, était mélangé avec de l'oxygène. Si, dans ces conditions, on projette l'image de la flamme sur la fente du spectroscope, on aperçoit le spectre du strontium, bien que son éclat soit très faible. Mais les raies de ce métal deviennent très brillantes aussitôt qu'on fait éclater l'étincelle entre les électrodes de l'excitateur. Le renforcement de l'intensité lumineuse est très net, d'autant plus que les raies du spectre du strontium, dans la flamme, sont très longues et très faibles, et les parties non renforcées servent de terme de comparaison. Elles traversent,

en effet, de haut en bas, le champ du spectroscope, tandis que le spectre de l'étincelle n'occupe qu'une bande dans la partie médiane du champ (*fig.* 20). Dès lors, quand le

Fig. 20.



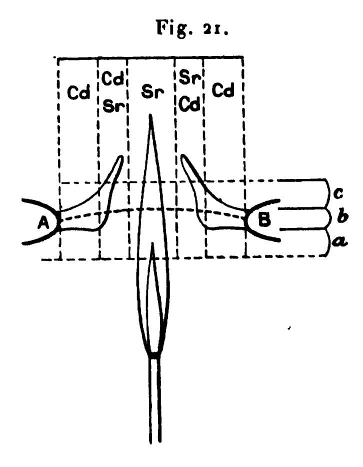
courant passe et que la bobine de self-induction est exclue du circuit, on voit dans la zone médiane *b* du champ du spectroscope les raies de l'air, accompagnées des raies très brillantes du strontium, dont les prolongements en haut et en bas sont à peine visibles. Cependant, dans la région *a* l'intensité lumineuse des raies du strontium devient plus forte que celle des raies de la région *c*. Étant donné que l'image est renversée par la lentille de projection, les raies de la région *a* (*fig.* 20) sont fournies par la partie *a* (*fig.* 21) de la flamme, qui se trouve *au-dessous* de l'étincelle, et les raies de la région *c* (*fig.* 20), par la partie *c* (*fig.* 21) de la flamme. Le spectre *b* est celui de l'étincelle.

En déplaçant lentement l'excitateur à droite ou à gauche, le spectre du strontium pâlit graduellement et disparaît de toutes les trois régions du champ du spectroscope simultanément. En même temps apparaissent les raies métalliques de l'électrode.

Ainsi donc, en explorant l'étincelle d'un bout à l'autre, on y distingue cinq parties ayant des spectres différents (*fig.* 21). Voici la succession des phénomènes spectroscopiques qu'on observe entre deux électrodes en cadmium : 1° Spectre du cadmium seul; 2° Spectres du cadmium et du strontium; 3° Spectre du strontium seul; 4° Spectres du strontium et du cadmium; 5° Spectre du

cadmium seul. Je ne fais pas mention des raies de l'air, parce qu'elles sont communes à toutes les régions et

Fig. 21.



qu'elles disparaissent de partout lorsqu'on intercale une self-induction dans le secondaire de la bobine d'induction.

52. Ce qui vient d'être dit démontre que la vapeur du strontium n'est pas entraînée par le trait lumineux. On a ainsi la preuve que l'ordre de grandeur de la vitesse des particules de la vapeur métallique dans le trait lumineux n'est pas supérieur à celui de la vitesse des particules de l'auréole, puisque comme celles-ci elles sont entraînées par le courant d'air ascendant créé par la flamme.

Mais les expériences de MM. Schuster et Hemsalech ont démontré que les vitesses dans les deux parties de l'étincelle ne sont pas du même ordre de grandeur. En effet, si les particules matérielles se déplaçaient dans le trait lumineux avec une vitesse voisine de celle de l'auréole, on aurait obtenu une déviation du trait lumineux sur la pellicule mobile. Or, sur toutes les photographies, la direction du trait lumineux ne change jamais, tandis que l'image de l'auréole se trouve inclinée sur celle du trait lumineux.

Nous avons donc démontré que la vitesse des particules dans le trait lumineux n'est pas supérieure à la vitesse des particules de l'auréole; d'après les expériences de MM. Schuster et Hemsalech, elle n'est pas du même ordre de grandeur. Il faut en conclure qu'elle est nulle, et que *le trait lumineux, qui est la phase première de l'étincelle, consiste dans une illumination simultanée de toutes les molécules du gaz se trouvant sur le chemin de la décharge.*

53. L'illumination du gaz traversé par une décharge est un phénomène critique après lequel les propriétés du gaz sont profondément altérées. En effet, le gaz, qui avant l'illumination était un isolant, devient conducteur; lorsque le gaz employé est un corps composé, il se décompose.

Il est donc légitime de supposer que ce passage de l'état isolant à l'état conducteur, passage brusque et accompagné de lumière, est une sorte d'explosion des molécules du gaz. Nous avons démontré que pendant cette explosion la matière n'est pas projetée dans la direction de l'étincelle.

Je vais démontrer que les trajectoires de la matière projetée s'orientent dans les plans normaux à l'étincelle.

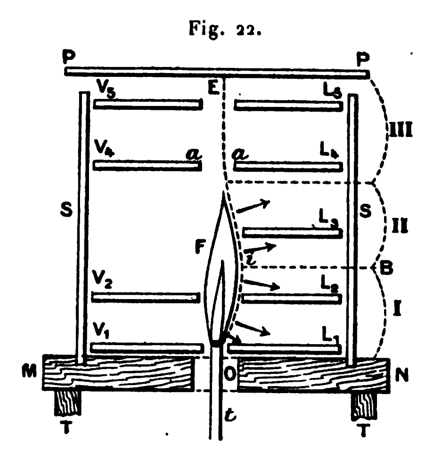
4° Projection de la matière autour du trait lumineux.

54. *Méthode expérimentale.* — Une étincelle traversant la flamme de gaz d'éclairage décompose l'hydrogène sulfuré qui s'y trouve en petites quantités; les produits de cette décomposition sont projetés autour du trait lumineux. En suivant les trajectoires des particules du soufre projeté autour d'une étincelle dépourvue de son auréole, on détermine les directions des forces qui font éclater les molécules.

55. *Appareils.* — L'étincelle jaillit entre une petite

flamme F (*fig.* 22) et une lame métallique PP (¹). Le

Fig. 22.



gaz d'éclairage arrive par un petit tube *t* en laiton qui termine un bec de gaz décrit antérieurement (*fig.* 7). L'étincelle passe par la gaine extérieure de la flamme en décrivant une courbe dont un point *i* a la tangente verticale. La position de ce point dépend de la longueur de la flamme; lorsque le débit du gaz est maintenu constant, et que la flamme est protégée contre les courants d'air, l'étincelle a une position fixe et le point *i* ne change pas de place.

Pour protéger la flamme contre les courants d'air, la flamme est placée dans une petite boîte en verre qui sert en même temps de support pour des lames de verre L_1, ..., L_5, et V_1, ..., V_5 destinées à recevoir la matière projetée par l'étincelle.

Cette boîte rectangulaire se compose d'une planchette horizontale MN en bois et de quatre lames verticales SS en verre perpendiculaires deux à deux. La boîte repose sur quatre tiges en verre TT. Son fond MN est percé au

---

(¹) J. SEMENOV, *Comptes rendus*, 14 avril 1903.

centre d'un trou OO qui laisse passer le bec de gaz. Une lame métallique PP, indépendante de la boîte et supportée par un support isolant, sert de couvercle, sans cependant toucher les parois latérales, de sorte que les produits de combustion peuvent s'échapper par cet interstice en passant entre le couvercle métallique PP et les deux lames de verre L_5 et V_5.

Les lames de verre qui reçoivent la matière projetée sont portées à des hauteurs différentes comme des rayons dans une armoire. Elles ont la forme rectangulaire et leurs dimensions sont de $6^{cm} \times 2^{cm},5$ environ. Les lames L_1 et V_1 sont simplement posées sur la planche MN, des deux côtés de l'extrémité supérieure du bec de gaz. La distance entre l'orifice du bec et la lame PP est de 8^{cm}.

56. *Expériences.* — Lorsqu'on fait passer la décharge pendant un certain laps de temps, les lames de verre se recouvrent d'un dépôt dont le dessin varie avec la position de la lame. C'est ainsi que sur toutes les lames placées horizontalement dans la région I (*fig.* 22), au-dessous de la ligne iB, c'est la face *supérieure* seule qui se recouvre d'un dépôt; les lames de la région II ne reçoivent un dépôt que sur leur face inférieure. Quant à la région III, les lames qui s'y trouvent reçoivent un dépôt abondant sur la tranche a, mais leurs deux faces horizontales restent sans dépôt, à l'exception des deux lames supérieures L_5 et V_5 dont la face en regard de la lame PP se recouvre d'un dépôt très abondant, où l'on trouve du soufre et des cristaux microscopiques du métal employé en guise de couvercle PP. Ce dernier dépôt ne peut pas nous intéresser parce qu'il provient du courant gazeux qui circule entre PP et L_5 et V_5; il n'est pas formé par la matière projetée autour de l'étincelle. Quant aux autres dépôts, nous allons les examiner en détail.

Ils s'obtiennent de la façon suivante : L'étincelle passe entre le point E de la plaque PP et la flamme qui a tou-

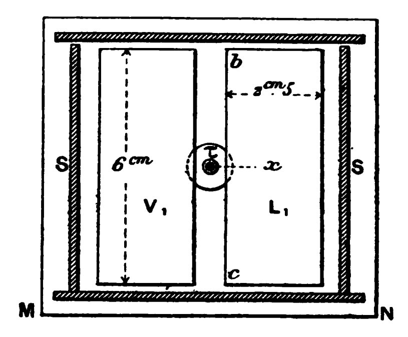
jours la même hauteur. Ce dernier détail a son importance parce que, comme cela a été déjà dit, la formation du dépôt dépend de la courbe décrite par l'étincelle. La constance de la hauteur de la flamme s'obtient en réglant le débit du gaz d'éclairage et en prenant soin de ne pas le changer au cours d'une expérience donnée. Chaque fois que je faisais varier la hauteur de la flamme pendant l'expérience, cela se faisait ressentir sur les dépôts en formation, surtout lorsque la lame étudiée était placée au voisinage du point i, où la tangente à l'étincelle est verticale. Par exemple, lorsqu'on commence une expérience en plaçant une lame un peu au-dessous de la ligne iB, le dépôt se forme sur sa face *supérieure*. Au bout de 2 heures, on voit au microscope des grains distribués très régulièrement sur cette face tandis que la face inférieure reste absolument propre. En remettant la lame à sa place, et en continuant l'expérience dans les mêmes conditions, le dépôt continue à augmenter et la face inférieure reste intacte; mais vient-on à diminuer la hauteur de la flamme, le point i change de place, et, si sa nouvelle position se trouve au-dessous du niveau de la lame en question, le dépôt sur la face supérieure cesse d'augmenter, mais, en revanche, un nouveau dépôt se forme sur la face inférieure de la lame.

La courbure de l'étincelle est facile à observer. Il suffit, pour cela, que l'orifice du bec ne soit pas horizontal, mais coupé en biseau. Alors l'étincelle partira toujours de la pointe ainsi formée et aura une position stable. En outre, bien que le sens du courant de la décharge n'influe pas sur la direction des projections, il est préférable que la flamme soit au pôle négatif, parce que, dans ce cas, le point E reste fixe tandis que, si la plaque métallique est au pôle négatif, le point E se déplace constamment. Mais le bec de gaz étant au pôle négatif, la flamme est dédoublée par l'étincelle comme cela était signalé au pa-

ragraphe 35 (*fig.* 10). Pour éviter cet inconvénient, grâce auquel les lames V_1, ..., V_5 peuvent être détruites, il faut que le diamètre du tube t ne soit pas inférieur à 1^{mm}. Avec ce diamètre, la flamme se dédouble très difficilement. Toutes ces conditions étant remplies, l'étincelle prend une direction déterminée qu'elle peut garder pendant plusieurs heures. Toutefois, les irrégularités inévitables du fonctionnement de l'interrupteur de la bobine produisent de petites fluctuations. Cependant, lorsque l'interrupteur est bien réglé, et qu'on ne le laisse pas se réchauffer en arrêtant le courant de temps en temps, on obtient une stabilité de l'étincelle tout à fait satisfaisante.

Dans toutes mes expériences, au cours desquelles j'ai obtenu 72 dépôts différents, l'étincelle avait la direction représentée sur la figure 22, c'est-à-dire à droite de la flamme si l'on regarde dans la direction perpendiculaire à une même paroi latérale S. De cette façon, l'étincelle aboutissant au point x (*fig.* 23) du bec de gaz, et cachée

Fig. 23.



des lames V par la flamme, passait en regard du milieu du bord bc des lames L. Le gaz devait être allumé avant l'introduction des lames de verre dans la boîte; pour ne pas introduire de matières étrangères, je l'allumai en faisant éclater l'étincelle entre la plaque P et le tube t,

et en ouvrant le robinet du gaz. La flamme une fois allumée, je la diminuai autant que possible et je plaçai les lames de verre, après quoi j'augmentai petit à petit la hauteur de la flamme. Lorsque la buée qui se forme sur les lames disparaît entièrement, je règle définitivement la hauteur de la flamme et je lance le courant dans la bobine.

La durée de l'expérience variait de 20 minutes à 8 heures suivant qu'on voulait avoir un dépôt sur la lame L_1 ou sur une des lames sus-jacentes. On obtient en 20 minutes un dépôt bien visible sur la lame L_1, mais sa formation sur les lames L_2 et L_3 est beaucoup plus lente; en revanche, la matière projetée s'y distribue sur une plus grande surface tandis que sur la lame L_1 elle n'occupe qu'un demi-cercle de 2^{mm} à 5^{mm} de rayon.

Les lames V_1, V_2 et V_3 étant protégées par la flamme restaient toujours sans dépôt, mais la lame V_4 se comporte de la même façon que la lame L_4, en recevant la matière projetée principalement sur la tranche a.

57. La vapeur du soufre est projetée autour de l'étincelle et se condense sur les lames de verre en petits grains transparents et dont l'agglomération forme des couches transparentes d'une teinte jaunâtre et d'une épaisseur qui va en diminuant, en s'éloignant du point de l'émission. En outre, quelle que soit la position de la lame, le dépôt présente toujours des maxima et des minima de densité qui se succèdent alternativement en dessinant sur les lames des arcs de cercle dont le nombre ne dépasse jamais 5 (3 maximum et 2 minimum).

La figure 24 est une microphotographie (grossissement = 30 diamètres) d'un dépôt qui s'est formé en 2 heures d'expérience, la lame se trouvant dans la position L_1. Le premier maximum se distingue difficilement sur cette figure; il occupe une très petite surface au bord de la ligne horizontale qui représente le bord bc de la lame; on voit ensuite une tache blanche qui est le premier mi-

nimum; les trois zones suivantes se distinguent fort bien. Le rayon de l'arc extérieur du dépôt en question est de $2^{mm},5$. Au delà de cette zone, les grains se déposent

Fig. 24.



sans aucun ordre apparent; mais leur volume augmente régulièrement en s'éloignant du point de l'émission. A une distance de 4^{cm} à 5^{cm} de l'étincelle, ils accusent une structure nettement cristalline et agissent sur la lumière polarisée. En prolongeant l'expérience pendant 8 heures, j'ai obtenu des cristaux de $0^{mm},1$ de longueur.

Au voisinage de l'étincelle les grains sont excessivement petits. Dans les trois zones de maximum de densité du dépôt, tous les grains sont à peu près de mêmes dimensions, de l'ordre de grandeur de 6×10^{-5} centimètres.

Le rayon et la largeur des zones sont d'autant plus grands que la lame recevant le dépôt se trouve plus haut. C'est ainsi que le rayon de l'arc extérieur sur la lame L_1

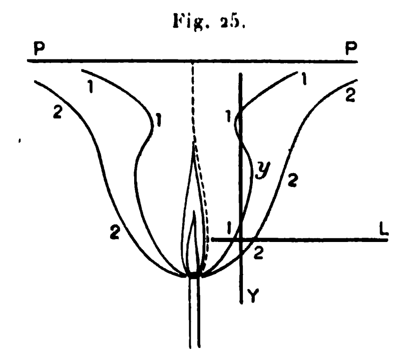
est de $2^{mm},5$, tandis que le même rayon sur une lame L_3 peut atteindre 3^{cm}, suivant la hauteur de la flamme.

58. Ces zones circulaires correspondent aux lignes d'intersection des lames de verre avec les surfaces de niveau des températures de l'air entourant la flamme.

La zone du premier maximum correspond à la température à laquelle aucun des composés du soufre avec l'oxygène ne peut résister sans se dissocier, tandis que le dernier maximum doit correspondre à une température inférieure à celle de la composition du soufre avec l'oxygène.

D'après l'aspect des dépôts obtenus sur des lames placées à des hauteurs différentes, les surfaces de niveau des températures sont des figures de révolution engendrées par les courbes représentées sur la figure 25. Les

Fig. 25.

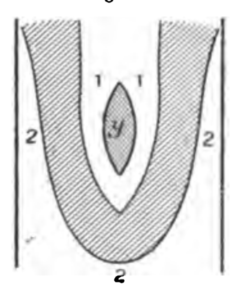


courbes 1, ..., 1 et 2, ..., 2 correspondent aux températures de combustion du soufre dans l'oxygène.

Aussi obtient-on des courbes de minima et de maxima de densité d'aspects différents selon la position des lames de verre. Sur des lames horizontales ces courbes sont des arcs de cercle, tandis qu'une lame verticale Y présente des courbes plus compliquées de la figure 26, où les noirs représentent les maxima et les blancs les minima de densité.

59. La projection du soufre autour de l'étincelle n'est pas un effet de température, parce qu'une élévation brusque de température aurait provoqué une augmentation de pression égale pour toutes les directions. Dans ce cas, la projection de la matière aurait dû avoir lieu dans tous les sens, et une lame placée au voisinage de l'étincelle se recouvrirait d'un dépôt sur ses deux faces. Or, l'expérience prouve que tel n'est pas le cas et que les lames se recouvrent d'un dépôt d'une façon qui indique une orientation déterminée des trajectoires de la matière projetée. Ces trajectoires ont la direction des flèches de la figure 22, c'est-à-dire elles sont normales à l'étincelle.

Fig. 26.



Il en résulte que, *à chaque point de l'étincelle, les forces qui font éclater les molécules du gaz sont orientées dans le plan normal à la ligne du courant électrique.*

60. M. J. Borgmann a observé récemment ([1]) dans un tube évacué des mouvements de la matière orientés dans les plans normaux à la ligne du courant.

Suivant l'axe d'une ampoule cylindrique en verre se trouve fixé un fil de platine, relié à un des pôles d'une

---

([1]) *Physikalish. Zeit.*, t. IV, p. 401, 1903 et *Journ. de la Soc. Phys.-Chim. de Saint-Pétersbourg*, 1903.

bobine de Ruhmkorff. La pression du gaz dans l'ampoule est réduite à 15^{cm} de mercure. Lorsqu'on décharge la bobine à travers un excitateur, des stratifications se produisent dans l'ampoule. Toutes les strates ont une position fixe dont l'axe commun se confond avec le fil de platine.

On met dans l'ampoule un peu de poudre très fine et légère et l'on refait l'expérience. Dès qu'on lance le courant dans la bobine, la poudre se met à se mouvoir et se dispose en couches régulières et équidistantes. Au-dessous de chacune des strates se place une couche de poudre.

Lorsque le vide est poussé jusqu'à 1^{mm}, les strates deviennent très pâles et l'on ne voit plus la poudre. Mais il suffit d'éclairer l'ampoule avec une source de lumière quelconque pour que la poudre devienne visible. On voit alors qu'elle exécute des mouvements tourbillonnaires très vifs. Chaque strate se trouve entourée d'un tourbillon de poudre, et ces mouvements continuent pendant 3 ou 4 minutes après l'arrêt du courant primaire de la bobine.

Dans ces expériences, les oscillations électriques qui se propagent le long du fil de platine engendrent dans le gaz environnant des forces mécaniques orientées dans les plans normaux à la ligne de propagation des oscillations.

En rapprochant ce fait du résultat de nos expériences ainsi que de celles de M. Nicolaëv (*voir* § 5), nous retrouvons l'image des lignes des forces donnée par Faraday, d'après laquelle une tension existe au sein du diélectrique suivant les lignes des forces et une pression dans la direction perpendiculaire.

Lorsque la force de cette pression dépasse la résistance des molécules, celles-ci éclatent, et leurs parties sont projetées normalement à la direction des lignes des forces électriques.

61. Grâce à cette projection de la matière autour de l'étincelle une pression se manifeste dans l'espace environnant. MM. Haschek et Mache ([1]) l'ont mesurée et ont trouvé qu'elle atteint 51,7 atmosphères, l'étincelle éclatant à air libre et ayant une longueur de 3^{mm}. Les calculs basés sur les déplacements des raies spectrales fournissent aussi des valeurs considérables pour la pression de l'étincelle ([2]).

Il est évident que, si cette pression dépassant 50 atmosphères s'exerçait dans toutes les directions, la vapeur métallique qui se produit sur les électrodes n'aurait pas pu pénétrer dans l'espace entre les deux pôles. Elle aurait été constamment repoussée en arrière, et l'étincelle n'aurait pas pu fournir les spectres métalliques.

Or, l'expérience prouve le contraire. La décharge initiale fournit le spectre de l'air et, immédiatement après, on aperçoit la vapeur métallique entre les deux électrodes.

Il faut donc conclure que la pression de l'étincelle ne s'exerce pas dans la direction de l'étincelle mais seulement dans les directions perpendiculaires à cette dernière, ce qui est conforme aux résultats des expériences énoncés au paragraphe 59.

CONCLUSIONS.

62. Faraday a établi que le diélectrique qui sépare deux conducteurs entre lesquels existe une différence de potentiel se trouve dans un état de polarisation spéciale, dénommée par lui *electrical strength,* ou *cohésion diélectrique.*

M. E. Bouty a étudié la *cohésion diélectrique* des gaz

([1]) *Wied. Ann.*, t. LXVIII, 1899, p. 240.

([2]) M. Mohler, *Astroph. Journ.*, t. IV, 1896, p. 175. M. Humphreys, *Ibid.*, t. VI, 1897, p. 169.

et a démontré que sa limite supérieure, après laquelle le gaz devient conducteur, est une constante indépendante de la température, mais qui dépend de la quantité absolue du gaz renfermé dans un volume donné.

La cohésion diélectrique des gaz est, d'après M. E. Bouty, une propriété moléculaire.

63. M. Bouty a constaté, en outre, que le passage de l'état isolant à l'état conducteur est un phénomène instantané.

64. Les expériences de Feddersen et de MM. Schuster et Hemsalech ont prouvé que l'étincelle est constituée par un trait lumineux et par une auréole.

L'auréole est une traînée de particules métalliques lumineuses se déplaçant d'un pôle à l'autre avec une vitesse finie.

Le trait lumineux a lieu dans le gaz où éclate l'étincelle; il se manifeste par l'illumination des particules gazeuses.

65. M. J.-J. Thomson explique la décharge électrique dans les gaz par sa théorie corpusculaire des ions. D'après cette théorie l'étincelle est un courant de convection dont les véhicules sont des ions de signes contraires.

Dans cette explication on est obligé de recourir à l'hypothèse de l'existence préalable d'ions libres dans les gaz où éclate l'étincelle.

En plus, d'après cette théorie, l'étincelle électrique doit être précédée d'un courant de convection invisible, d'intensité croissante, ce qui donne lieu à un *retard* de la décharge.

66. Or, d'après les expériences de M. Bouty, le *retard* de la décharge ne se manifeste pas toujours.

Ce retard se manifeste souvent comme un phénomène parasite, lorsque toutes les précautions ne sont pas prises.

Ces précautions ayant été prises, on n'observe pas de retard. Donc, si ce phénomène existe, sa durée doit

être excessivement courte, inappréciable à l'observation directe.

L'existence d'un pareil retard n'a été constatée par personne, autant que nous sachions.

Ainsi donc, l'hypothèse sur laquelle repose la théorie corpusculaire de l'étincelle n'est pas confirmée par l'expérience.

D'autre part, le trait lumineux, qui est la phase initiale de la décharge électrique, n'est pas expliqué par cette théorie.

Au contraire, toutes les données expérimentales tendent à prouver que le trait lumineux est un phénomène instantané qui se manifeste par une illumination simultanée de tous les points du volume occupé par le trait lumineux de l'étincelle ou par l'effluve dans les gaz raréfiés.

La théorie corpusculaire des ions n'est donc pas suffisante pour expliquer le phénomène de l'étincelle électrique.

67. J'ai démontré, dans mes expériences, qu'un courant d'air créé par une flamme débarrasse l'étincelle de son auréole. Le trait lumineux, mis ainsi à nu, n'offre qu'un spectre de l'air, ce qui prouve qu'une étincelle peut se produire et durer sans qu'il y ait transport d'un pôle à l'autre de la matière arrachée à ces pôles.

L'auréole de l'étincelle est constituée par la vapeur métallique dégagée par les électrodes et transportée dans un seul sens du pôle positif vers le pôle négatif.

Le trait lumineux est une manifestation lumineuse de la dissociation brusque des molécules gazeuses sous l'influence du champ électrique, dont la valeur dépasse la limite déterminée par la *cohésion diélectrique* du gaz donné.

Cette dissociation est accompagnée d'une projection de matière autour de l'étincelle électrique.

Les trajectoires de la matière projetée sont orientées dans les plans normaux à l'étincelle.

68. Il résulte de ce qui vient d'être dit, que l'étincelle électrique se produit de la façon que voici :

Le champ électrique suscite dans les molécules d'un gaz, perpendiculairement aux lignes des forces électriques, des forces intérieures qui tendent à faire éclater ces molécules.

Lorsque la résistance des molécules est dépassée, elles éclatent avec un dégagement de lumière, les parties dissociées étant projetées perpendiculairement à l'étincelle : c'est le trait lumineux, la première phase de la décharge.

La matière, projetée de la sorte, exerce une pression sur le gaz entourant l'étincelle, tandis qu'un vide se produit le long de l'étincelle.

Sous la pression ambiante, ainsi que par l'action des forces électriques, le gaz et la vapeur métallique qui entourent les électrodes se précipitent dans ce canal et déterminent le transport de la matière. C'est le flux anodique ou l'auréole de l'étincelle.

Ces deux phénomènes principaux peuvent produire d'autres phénomènes secondaires qui, suivant les conditions extérieures de l'expérience, modifient l'apparence de la décharge et masquent le phénomène principal.

Vu et approuvé :
Paris, le 3 mars 1904.
LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,
PAUL APPELL.

Vu et permis d'imprimer :
Paris, le 3 mars 1904.
LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,
L. LIARD.

SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Chimie. — Préparation de l'uranium au four électrique.

Vu et approuvé :

Paris, le 3 mars 1904.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

PAUL APPELL.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 3 mars 1904.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

L. LIARD.

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

INTRODUCTION 1

I. — Historique.

Numéros.

1-3.	Expériences anciennes	4
4-5.	Le rôle du diélectrique	7
6.	Expériences de Masson	11
7-9.	Constitution de l'étincelle	12
10.	Décharge dans les gaz raréfiés	18
11.	Le *tourniquet électrique* de M. Bichat	20
12-17.	La théorie *corpusculaire* des ions	21
18-25.	La décharge électrique au point de vue de la théorie des ions	33
26-28.	Le *retard* de la décharge	41

II. — Recherches expérimentales sur l'étincelle électrique.

29-30.	Principe de la méthode	46
31-35.	1° Action de la charge statique et de l'étincelle sur les flammes	48
36-45.	2° Actions mécaniques et calorifiques de l'étincelle	57
46-53.	3° Étude spectroscopique de l'auréole et du trait lumineux	69
54-61.	4° Projection de la matière autour du trait lumineux...	78

CONCLUSIONS 88

34844 Paris. — Imprimerie Gauthier-Villars, 55, quai des Grands-Augustins.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
31644 Quai des Grands-Augustins, 55.

